

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL  
UNIVERSIDADE DE STUTTGART

KONRAD FRANK JANZEN

AVALIAR A POSSIBILIDADE DA DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS  
GERADOS NO BRASIL  
PELO MODELO DE COPROCESSAMENTO UTILIZADO EM FORNOS DE  
CLINQUERIZAÇÃO NA ALEMANHA

CURITIBA  
2013

KONRAD FRANK JANZEN

POSSIBILIDADE DA DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS GERADOS NO  
BRASIL  
PELO MODELO DE COPROCESSAMENTO UTILIZADO EM FORNOS DE  
CLINQUERIZAÇÃO NA ALEMANHA

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial da parceria entre a Universidade Federal do Paraná, Universidade de Stuttgart e o Sistema Nacional de Aprendizagem Industrial do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Margarete L. Erbe  
Co-Orientadores: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Daniela Neuffer e Prof.  
Dr. Klaus Martin Fischer

CURITIBA  
2013

---

J35a

Janzen, Konrad Frank

Possibilidade da destinação de resíduos industriais gerados no Brasil pelo modelo de coprocessamento utilizado em fornos de clínquerização na Alemanha / Konrad Frank Janzen. – Curitiba, 2013.

130 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia em parceria com a Universidade de Stuttgart e o Sistema Nacional de Aprendizagem Industrial do Paraná. Programa de Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial, 2013.

Orientador: Margarete L. Erbe, Coorientadores: Daniela Neuffer e Klaus Martin Fischer.

Bibliografia: p. 116-121.

1. Resíduos industriais. 2. Reaproveitamento - (Sobras, refugos, etc.).  
I. Universidade Federal do Paraná. II. Erbe, Margarete Casagrande Lass.  
III. Neuffer, Daniela. IV. Fischer, Klaus Martin. V. Título.

CDD: 628.44

---

## TERMO DE APROVAÇÃO

KONRAD FRANK JANZEN

### AVALIAR A POSSIBILIDADE DA DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS GERADOS NO BRASIL PELO MODELO DE COPROCESSAMENTO UTILIZADO EM FORNOS DE CLINQUERIZAÇÃO NA ALEMANHA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com SENAI-PR e a *Universität Stuttgart*, Alemanha, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a):  Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> **MARGARETE CASAGRANDE LASS ERBE**  
MAUI/UFPR

 Prof. Dr. **CARLOS MELLO GARCIAS**  
PUCPR

 Prof. Dr. **GEROGES KASKANTZIS NETO**  
MAUI/UFPR



 Prof(a). Dr(a). **MARGARETE CASAGRANDE LASS ERBE**  
Coordenadora do PPGMAUI-UFPR

Curitiba, 30 de agosto de 2013.

## AGRADECIMENTOS

A Jesus Cristo por seu cuidado e provisão.

A minha esposa e filhos pela compreensão e apoio incondicional.

Aos professores orientadores Dr<sup>a</sup>. Margarete L. Erbe, Dr<sup>a</sup>. Daniela Neuffer e Dr. Klaus Martin Fischer por acreditar neste trabalho, pela paciência, incentivo e amizade manifestados ao longo da elaboração deste trabalho.

Aos colegas de mestrado pela parceria e amizade, especialmente aos companheiros do período na Alemanha: Pedro Américo Norcio Duarte e Caroline Schoenberger.

Aos colegas do ISWA – *Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft* da universidade de Stuttgart, que calorosamente me receberam e apoiaram enquanto estive na Alemanha.

Ao DAAD e ao governo Alemão por ter me disponibilizado o apoio através da bolsa de mestrado.

## RESUMO

O coprocessamento é considerado uma opção ambientalmente indicada para resíduos que não podem ser reciclados ou reusados. No processo, os resíduos podem ser aproveitados como matérias-primas (substituindo recursos naturais) e como combustíveis (no lugar de combustíveis fósseis), utilizando o potencial energético, além do aproveitamento das cinzas geradas. Sendo referência na área ambiental, a Alemanha possui legislações ambientais mais rigorosas que as da comunidade europeia e coprocessa mais que o dobro que o Brasil, apesar de produzir menos da metade do volume de cimento. O presente trabalho foi realizado com base na pesquisa bibliográfica e período prático de estágio na Alemanha. Apresenta e compara os fatores operacionais e legais ligados ao coprocessamento nos dois países. Com base nos dados foi verificada a aplicabilidade de destinação de resíduos, já autorizados para coprocessamento no Brasil, no sistema alemão. Na comparação foram utilizados 5 grupos de resíduos, com total de 25 caracterizações diferentes. Nas regulamentações foram encontradas diferenças tanto nos parâmetros exigidos, quanto nos limites estabelecidos. A diferença de limites das legislações dos dois países foi significativa. Dos 25 resíduos comparados 15 foram reprovados nos limites alemães e 5 dos aprovados deveriam ser sujeitos a condicionantes para utilização no coprocessamento. A partir da análise dos limites das legislações ambientais aplicáveis e das diferenças operacionais, o objetivo do trabalho é verificar a aplicabilidade do sistema alemão para resíduos brasileiros. Os resultados mostram que existe uma grande diferença entre os sistemas da mesma tecnologia, gerando, portanto, uma necessidade de reflexão.

**Palavras-chave:** Coprocessamento, Resíduos, Legislação Brasil-Alemanha, Aplicabilidade, Clinquer.

## ABSTRACT

*The coprocessing is considered a commended treatment technology for waste that can not be recycled or reused. In the process, the waste can be utilized as raw materials (replacing natural resources) and as fuel (instead of fossil fuels), using the heat potencial in addition to the utilization of the generated ash. Being an environmental reference, Germany has stricter environmental legislation than the European community and coprocess more than double of Brazil, despite producing less than half of the volume cement. This study was conducted based on bibliographic research and period of practical internship in Germany. Presents and compares the legal and operational factors related to co-processing in both countries. Based on the data, it was verified the applicability of disposal, of waste already approved for co-processing in Brazil, in the German system. In the comparison 5 groups of residues have been used, with total of 25 different characterizations. In the laws were found differences as in parameters required as in the established limits. The difference in the limits of the regulations of the two countries was significant. From the 25 residues, 15 were disapproved on Germans limits and 5 of the approved should be submitted to constraints for use in co-processing. From the analysis of the limits of the environmental laws and operational differences, the objective is to verify the applicability of the German system for Brazilians waste. The results show that there is a big difference between the systems of the same technology, resulting, therefore, a need for reflection.*

**Keywords:** Co-processing, Waste Legislation Brazil-Germany, Applicability, Clinker.

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1- METAIS: ORIGEM, COMPORTAMENTO E IMPACTO .....	57
QUADRO 2- HISTÓRICO LEGISLAÇÃO COPROCESSAMENTO NO BRASIL.....	69
QUADRO 3- LIMITES MÁXIMOS DE EMISSÕES CONAMA 264/99 .....	71
QUADRO 4- LIMITES DE COMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS PARA COPROCESSAMENTO NO BRASIL.....	75
QUADRO 5- LIMITES EMISSÕES BRASIL .....	77
QUADRO 6- LIMITES COMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS PARA COPROCESSAMENTO NA ALEMANHA .....	81
QUADRO 7- LIMITES EMISSÕES ALEMANHA .....	83
QUADRO 8- COMPARAÇÃO DO DIREITO AMBIENTAL ALEMANHA BRASIL ....	87
QUADRO 9- COMPARAÇÃO LIMITES COMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS PARA COPROCESSAMENTO.....	90
QUADRO 10- COMPARAÇÃO DAS LEGISLAÇÕES DE EMISSÕES BRASIL/ALEMANHA.....	93
QUADRO 11- RESUMO DA COMPARAÇÃO DAS LEGISLAÇÕES DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS BRASIL/ALEMANHA.....	96
QUADRO 12- QUANTIDADE DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS (RSI) POR TECNOLOGIA DE DESTINAÇÃO NO BRASIL- BASE 2008 ....	99
QUADRO 13- ANÁLISES LABORATORIAIS DE ÁGUAS CONTAMINADAS .....	103
QUADRO 14- ANÁLISES LABORATORIAIS DE LODOS INDUSTRIAIS .....	105
QUADRO 15- ANÁLISES LABORATORIAIS DE SOLVENTES E BORRAS DE TINTA.....	107
QUADRO 16- ANÁLISES LABORATORIAIS DE SÓLIDOS NÃO RECICLÁVEIS ..	109
QUADRO 17- ANÁLISES LABORATORIAIS DE SÓLIDOS CONTAMINADOS .....	111



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- HIERARQUIA DA GESTÃO DE RESÍDUOS .....	17
FIGURA 2- PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CIMENTO.....	26
FIGURA 3- HOMOGENEIZAÇÃO .....	28
FIGURA 4- EXEMPLOS DE MOINHOS .....	29
FIGURA 5- MAÇARICO .....	31
FIGURA 6- PERFIL DE TEMPERATURA DOS GASES E DO MATERIAL EM UM SISTEMA DE FORNO COM CICLONES .....	32
FIGURA 7- FASES DO CLINQUER .....	34
FIGURA 8- <i>BY PASS</i> .....	36
FIGURA 9- ORIGEM DE RESÍDUOS PARA USO NO COPROCESSAMENTO.....	42
FIGURA 10- COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE ELEMENTOS TRAÇO EM CDR E RESÍDUO NÃO RECICLÁVEL .....	46
FIGURA 11- EVOLUÇÃO DO COPROCESSAMENTO NO BRASIL .....	99

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1- DESTINAÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM DIFERENTES PAÍSES.....	19
TABELA 2- USO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS NA ALEMANHA .....	41
TABELA 3- PODER CALORÍFICO DE COMBUSTÍVEIS DE SUBSTITUIÇÃO.....	42
TABELA 4- RESÍDUOS COMO MATÉRIA-PRIMA DE SUBSTITUIÇÃO NA ALEMANHA.....	47
TABELA 5- EMISSÕES DE CO <sub>2</sub> POR ORIGEM DE GERAÇÃO .....	51
TABELA 6- FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE TOXICIDADE (FTEQ) OU FATORES TÓXICOS .....	63
TABELA 7- SETOR DE CIMENTO E COPROCESSAMENTO BRASIL ALEMANHA.....	100

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	- $\text{Al}_2\text{O}_3$
ABCP	- Associação Brasileira de cimento Portland
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
$\text{Al}_2\text{O}_3$	- Óxido de Alumínio
C	- CaO
$^{\circ}\text{C}$	- Grau Celsius
CaO	- Cal, óxido de cálcio
CDR	- Combustível derivado de resíduos
CE	- Comissão Européia
CEMA/PR	- Conselho estadual de meio ambiente do Paraná
CEMBUREAU	- (European Cement Association) Associação Européia dos Produtores de Cimento
CETESB	- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONSEMA	- Conselho estadual de meio ambiente do Rio Grande do Sul
COPAM	- Conselho Estadual De Política Ambienta Conselho Estadual De Política Ambiental
COT	- Carbono orgânico total
COV	- Compostos orgânicos voláteis
CSI	- Iniciativa para a sustentabilidade do cimento
EPA	- Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América
EURITIS	- <i>European Union for Responsible Incineration and Treatment of Special Waste</i> , (União Européia para Tratamento e Incineração Responsável de Resíduos Especiais)
F	- $\text{Fe}_2\text{O}_3$
g	- Grama
HCl	- Cloreto de hidrogênio
K	- Grau Kelvin
kcal	- Quilocaloria (1 kcal = 4,19 kJ)
kg	- Quilograma (1 kg = 1.000 g)
kJ	- Quilojoule (1 kJ = 0,24 kcal)

LQ	- Limite de quantificação
MG	- Minas Gerais
mg/kg	- Miligramas por quilogramas
MJ	- Megajoule (1 MJ = 1.000 kJ )
Mol	- Mol
MP	- Material particulado
MTD	- Melhores técnicas disponíveis
NBR	- Norma brasileira
NI	- Não informado
Nm <sup>3</sup>	- Normal metro cúbico (101,3 kPa, 273 K)
NO <sub>x</sub>	- Óxidos de nitrogênio (NO + NO <sub>2</sub> )
PCS	- Poder calorífico superior
PCB	- Bifenilas policloradas
PCDDs	- Dibenzodioxinas policloradas
PCDFs	- Dibenzofuranos policlorados
PCOP's	- Poluentes Orgânicos Persistentes
PNRS	- Política Nacional de Resíduos Sólidos
ppmv	- Partes por milhão (base volumétrica)
PR	- Paraná
RSI	- resíduos sólidos industriais
S	- SiO <sub>2</sub>
SO <sub>x</sub>	- Óxidos de enxofre
SP	- São Paulo
t	- Tonelada (métrica)
TCDD 2,3,7,8	- tetracloro-dibenzo-para-dioxina
TCDF	- tetraclorodibenzofurano
TEF	- Fator de equivalência de toxicidade
TEQ	- Toxicidade equivalente
THC	- Hidrocarbonetos totais
UE	- União Europeia
VDZ	- Associação Alemã de Fábricas de Cimento (Verein Deutscher Zementwerke)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	15
1.1 OBJETIVO GERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	17
2.1 TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS	17
2.2 COPROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA DE CIMENTO	22
2.2.1 Histórico	22
2.2.2 Processos Operacionais	24
2.2.2.1 Extração da Matéria-Prima – Jazida e Britador	27
2.2.2.2 Homogeneização da Matéria-Prima	28
2.2.2.3 Moagem e Armazenamento – Moinho e Silo de Farinha Crua	29
2.2.2.4 Ciclones –Torre de Pré-Aquecimento	30
2.2.2.5 Pré-Calcinador - Torre de Pré-Aquecimento	30
2.2.2.6 Forno e Produção do Clínquer–Torre de Pré Aquecimento, Resfriador de Clínquer, Forno	31
2.2.2.7 <i>By-Pass</i>	35
2.2.2.8 Resfriamento e Armazenamento Temporário – Resfriador de Clínquer e Silo de Clínquer	36
2.2.2.9 Moagem com Aditivos e Estocagem – Gesso, Minerais, Separador, Silos de Cimento e Ensacadeira	37
2.2.3 Combustíveis de Substituição e Matérias-Primas de Substituição	38
2.2.3.1 Resíduos da Agricultura	43
2.2.3.2 Lodos de Estação de Tratamento de Esgoto.	44
2.2.3.3 Borracha	44
2.2.3.4 Plástico e Combustível Derivado do Resíduo(CDR)	45
2.2.3.5 Matérias-Primas de Substituição	46
2.2.3.6 Tipos de Alimentação no Forno	48
2.2.4 Impactos Ambientais	49
2.2.4.1 Dióxido de Carbono – CO <sub>2</sub>	51
2.2.4.2 Água - H <sub>2</sub> O	52
2.2.4.3 Monóxido de Carbono - CO	53
2.2.4.4 Óxidos de Enxofre - SO <sub>x</sub>	53
2.2.4.5 Óxidos de Nitrogênio - NO <sub>x</sub>	54
2.2.4.6 Ácido Clorídrico - HCl e Ácido Fluorídrico - HF	54
2.2.4.7 Material Particulado	55

2.2.4.8 Metais.....	56
2.2.4.9 Dioxinas e Furanos.....	62
2.2.4.10 Matérias Orgânicas .....	64
2.2.4.11 Outros.....	65
2.3 LEGISLAÇÃO E NORMAS REGULAMENTADORAS NO BRASIL E NA ALEMANHA .....	65
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>85</b>
<b>4. DISCUSSÃO DO COPROCESSAMENTO NO BRASIL E NA ALEMANHA.....</b>	<b>86</b>
4.1 LEGISLAÇÃO E NORMAS REGULAMENTADORAS NO BRASIL E NA ALEMANHA .....	86
4.2 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	98
4.3 APLICAÇÃO PARA RESÍDUOS INDUSTRIAIS.....	101
4.3.1 Águas Contaminadas .....	102
4.3.2 Lodos Industriais .....	104
4.3.3 Solventes e Borras de Tintas .....	106
4.3.4 Sólidos sem Contaminação.....	108
4.3.5 Sólidos Contaminados.....	110
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>113</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>116</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>122</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sempre foi presente na vida do homem e atualmente é um tema de grande preocupação dentro da sociedade. Na busca por destinações ambientalmente favoráveis para resíduos, o surgimento do coprocessamento se tornou uma solução, e é uma tecnologia recomendada para resíduos perigosos (COP10, 2011). Diante disso, o presente trabalho busca fazer um comparativo do coprocessamento realizado no Brasil e na Alemanha.

Em média, nas fábricas alemãs de cimento 61% de sua energia de combustíveis vêm da recuperação energética de resíduos no coprocessamento (VDZ, 2011). No Brasil esse índice não passa dos 12% (EPE, 2012).

O setor de destinação de resíduos brasileiro é crescente: no período de 2004 até 2009 o crescimento foi de 16% ao ano. Atualmente, no país, 76% dos resíduos industriais são destinados em aterros, o que em países de referência na área ambiental, como a Alemanha, é considerado ultrapassado. Cenário que demonstra a possibilidade de crescimento do setor de reaproveitamento energético de resíduos no Brasil, dentre eles o coprocessamento (DEL BEL E SALGOSA, 2012).

Neste estudo observou-se que na Alemanha o resíduo passou a ser chamado de subproduto. Não é apenas uma questão de nomenclatura, é uma mudança de cultura. O resíduo passou a ser visto como um material que possui valor e deve-se buscar processos para utilizar ao máximo o que cada subproduto disponibiliza. Segundo Karstensen (2006) a substituição de combustíveis fósseis por resíduos é uma das ações que contribuem para a sustentabilidade no processo de cimento. O uso de combustíveis de substituição pode diminuir os custos, comparando com o uso de combustíveis fósseis. Porém, podem aumentar os custos com controles ambientais (UBA, 2010).

As atividades envolvendo resíduos apresentam diversos impactos ambientais dentre os quais os presentes no coprocessamento estão aqui descritos. As legislações ambientais que regulamentam atividades com resíduos, aplicáveis para o coprocessamento, se diferem ao redor do mundo. A Alemanha possui legislações mais restritivas que o Brasil e que a Comunidade Européia.

Além da contextualização do coprocessamento, o trabalho apresenta uma comparação entre as legislações vigentes na Alemanha e no Brasil. As diferenças encontradas são significativas tanto em relação aos parâmetros quanto aos limites estabelecidos.

Por fim, este trabalho apresenta uma comparação entre as realidades do Brasil e da Alemanha quanto à tecnologia, a legislação e processos produtivos no coprocessamento, buscando a aplicação da legislação alemã para 5 grupos de resíduos comuns na indústria brasileira.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Verificar a possibilidade da destinação de resíduos industriais gerados no Brasil para serem coprocessados em fornos de clínquerização segundo o modelo aplicado na Alemanha.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Descrever tecnologias de coprocessamento em fábricas de cimento.
- Comparar processos de coprocessamento alemães com os brasileiros quanto às questões técnicas, operacionais e legais.
- Pesquisar informações de resíduos destinados para coprocessamento.
- Definir a melhor destinação conforme o sistema alemão para cinco tipos de resíduos industriais frequentes no Brasil.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS

Na história nunca se falou tanto em sustentabilidade e meio ambiente. O impacto do ser humano sobre a natureza é tema central desta discussão. A produção econômica e os hábitos diários das populações ao redor do planeta requerem o consumo de recursos naturais e geram um grande volume de resíduos. São produtos sem uso, matérias-primas não utilizadas, subprodutos de processos ou materiais de pós-consumo.

O uso sustentável dos recursos naturais iniciou, não apenas com a consciência ambiental, mas também com a “gestão da qualidade” que busca a qualidade do processo em todos os sentidos. A otimização do consumo da matéria-prima e redução de custos são pontos importantes neste processo. A FIGURA 1 descreve a hierarquia da gestão dos resíduos, ponto chave neste tema.



FIGURA 1 - HIERARQUIA DA GESTÃO DE RESÍDUOS  
FONTE: CE (2000)

Prevenção é a mais eficiente das ações de gestão de resíduos. iniciativas que reduzem a geração de matérias-primas vencidas, o desperdício de insumos e o número de produtos com falhas descartados. Ações que afetam diretamente a geração de resíduos. Qualquer redução neste estágio afeta diretamente o volume de

resíduos gerados e como consequência, elimina o possível passivo ambiental inerente ao volume de resíduo evitado.

Reuso é a melhor destinação para um resíduo. Encontrar uma possibilidade de reuso elimina a necessidade do processo de produção do produto novo, que certamente teria uso de matéria-prima e gasto energético, gerando impacto ao meio ambiente.

Reciclagem e recuperação seguem como as opções mais bem vistas e pesquisadas. Com a diminuição de oferta de matérias-primas tem-se como opção o reuso e a reciclagem. A reciclagem tem a grande vantagem de não ser necessário o uso de novos recursos naturais, deixando de impactar o meio ambiente na extração. O *Downcycling*, termo utilizado para processos de reciclagem em que o produto gerado é de qualidade inferior ao inicial, está presente em muitos processos de reciclagem como do papel e do plástico. Já o vidro e o alumínio são reciclados em processos onde o produto final tem a mesma qualidade de quando é usada a matéria-prima.

Recuperação na FIGURA 1 refere-se basicamente a recuperação energética que acontece quando o resíduo é destinado para a queima, fazendo o uso do seu potencial energético. O resíduo é utilizado para gerar calor ao mesmo tempo em que é convertida em um resíduo menos tóxico. A recuperação energética, não só tem a vantagem da utilização do poder energético, como da diminuição de volume do resíduo e redução do potencial de contaminação do meio ambiente na sua disposição final. Porém traz consigo o potencial de poluição pelas emissões atmosféricas.

Atualmente a hierarquia da gestão de resíduos (FIGURA 1) está com o triângulo oposto e por vezes não é levada em consideração. Muitos resíduos estão sendo destinados sem nenhum aproveitamento de reuso, reciclagem ou potencial energético. São destinados em lixões ou aterros sanitários que aparentemente são a maneira mais simples de destinação de resíduos, porém, normalmente, com o maior potencial de dano ambiental. Ainda que utilizada toda técnica, se o resíduo for bem destinado, o aterro concentra no mesmo local o risco, estando vulnerável ao erro humano ou as intempéries da natureza. Estes materiais poderiam estar voltando para a cadeia produtiva, gerando empregos, reduzindo custos na compra de matéria prima e de riscos para os geradores na disposição final.

Os países ao redor do mundo se diferem nas tendências de alternativas para a destinação dos resíduos. A União Européia que faz uso da diretiva de aterros 1999/31 (CE, 1999) determina que o volume de resíduos deve ser progressivamente diminuído. Na Alemanha o aterro deve receber apenas resíduos previamente processados, que não possam ser tratados com outra tecnologia de destinação final e que tenham no máximo 5% de orgânicos na sua composição (TA SIEDLUNGSABFALL, 1993). Nos Estados Unidos da América o uso de aterros ainda é predominante (BOGNER et al., 2007). No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos ainda visa à adequação dos lixões e a instalação de aterros sanitários até 2014 (BRASIL, 2010). Em 2008, 50,8% dos municípios destinavam seus resíduos em lixões, 22,5% em aterros controlados e apenas 27,7% em aterros sanitários (IBGE, 2008). Abaixo a TABELA 1 compara a destinação final de resíduos urbanos em vários países.

TABELA 1 - DESTINAÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM DIFERENTES PAÍSES.

País	Reciclagem	Compostagem	Recuperação Energética	Aterro Sanitário
Holanda	39%	7%	42%	12%
Suíça	31%	11%	45%	13%
Dinamarca	29%	2%	58%	11%
Estados Unidos	24%	8%	13%	55%
Austrália	20%	<<1%	<1%	80%
Alemanha	15%	5%	30%	50%
Japão	15%	-	78%	7%
Israel	13%	-	-	87%
França	12% <sup>(1)</sup>	n.i.	40%	48%
<b>BRASIL</b>	<b>8%</b>	<b>2%</b>	-	<b>90%</b> <sup>(2)</sup>
Reino Unido	8%	8%	8%	83%
Grécia	5%	-	-	95% <sup>(2)</sup>
Itália	3%	10%	7%	80%
Suécia	3%	5%	52%	40%
México	2%	-	-	98% <sup>(2)</sup>

(1) As estatísticas incluem a compostagem

(2) Incluem aterros controlados e lixões

n.i.- Não informado

FONTE: DEN, 2008

Na TABELA 1 podemos verificar que o Brasil está entre os países que não realiza a recuperação energética de resíduos urbanos. É o 3º país da lista que mais utiliza a tecnologia de aterro ou lixões, concentrando 90% das suas destinações. Para resíduos industriais, 76% são destinados em aterros, 18% para coprocessamento, 3% para compostagem e 3% para incineração e outros aproveitamentos energéticos (DEL BEL E SALGOSA, 2012).

O volume *per capita* de resíduos gerado em países desenvolvidos é maior do que em países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento. Com o crescimento populacional e o desenvolvimento do Brasil como economia emergente, a perspectiva é de um crescente volume de resíduos. O tema sobre a destinação adequada de resíduos deve ser amplamente discutido e tecnologias ambientalmente favoráveis de reuso, reciclagem e aproveitamento energético devem ser cada vez mais adotadas como opções para destinação.

Além das metas nacionais, muitas indústrias procuram certificações ambientais que exigem a destinação adequada para todos os resíduos gerados no processo, além de uma melhoria contínua nas práticas ambientais. As certificadoras pontuam as tecnologias ambientalmente corretas com maior índice, pressionando a indústria a buscar soluções de reciclagem, reuso ou recuperação.

Neste contexto, a necessidade de opções de tecnologias para tratamento e disposição final de resíduos ganha relevância primária dentro da questão ambiental para o desenvolvimento sustentável no Brasil.

Os aterros, se não forem bem construídos ou operados, apresentam risco de contaminação do lençol freático por meio do percolado<sup>1</sup> oriundo do resíduo. Passivos gerados desta forma de destinação são de difícil remediação por ocuparem grandes áreas, e pela dificuldade de identificação e acesso do ponto de contaminação. Além disso, esta tecnologia exige uma estrutura de tratamento de efluentes dispendiosa, demanda a ocupação de grandes áreas, contribui para a geração de gases do efeito estufa e gera odores. Adiciona-se ainda a questão estética negativa de uma grande área antropizada. A preocupação com o passivo para as futuras gerações também tem relevância, pois os resíduos estarão ali armazenados, caracterizados como um risco potencial.

A inviabilidade da reciclagem e de reuso de grande parcela dos resíduos industriais e domésticos, a falta de áreas passíveis de licenciamento para aterro e o aumento de geração pedem alternativas para a questão dos resíduos.

A exemplo de países desenvolvidos, os resíduos domiciliares e industriais, se pré-tratados e segregados, podem ser reciclados servindo de combustíveis e/ou de matéria-prima. Estas tecnologias, se bem empregadas, diminuem os riscos ao meio ambiente pela redução de volume de resíduos e destruição de produtos perigosos.

---

<sup>1</sup> Percolado é o líquido que permeia o maciço do aterro e escoar pela drenagem ou se acumula.

O risco à saúde também é reduzido pela eliminação de focos de proliferação de vetores e de contaminação de recursos hídricos.

O alto custo de implementação e de controle de emissões, o risco ambiental por emissão de gases tóxicos e a falta de regulamentação, são os grandes limitadores do uso destas tecnologias por países em desenvolvimento.

O resíduo de uma região possui propriedades particulares pelos tipos de indústria local, cultura, distribuição social e clima local. Dados como levantamento gravimétrico, composição, poder calorífico e possíveis contaminações são importantes no processo de decisão de qual tecnologia deve ser utilizada. Os limites de emissões são fatores restritivos no processo de licenciamento de plantas de aproveitamento energético de resíduos.

O combustível derivado de resíduo (CDR) é uma opção de tecnologia para que o resíduo possa ser aproveitado da melhor maneira sobre o ponto de vista energético e operacional para os fornos industriais. O resíduo passa por um processo de preparo e uniformização para se tornar um combustível de substituição.

Atualmente são poucas as opções para o reaproveitamento energético de resíduos industriais não recicláveis. O coprocessamento tem sido o mais utilizado, porém também possui fatores negativos como a sazonalidade de recebimento dos resíduos na indústria cimenteira, o alto custo e o alto padrão de qualidade dos resíduos exigidos pelas fábricas. A composição e o poder calorífico podem variar de forma a impactar a qualidade do processo.

O Plano Nacional de Energia 2030 (EPE e MME, 2007) prevê instalações de termelétricas utilizando resíduos, o que indica uma tendência do Brasil para os próximos 20 anos de aumento do aproveitamento energético de resíduos. Esta ação contribui para a redução do consumo de combustíveis fósseis e dos recursos naturais, assim como as emissões atmosféricas equivalentes, que contribuem para o efeito estufa.

Novas tecnologias para tratamento de resíduos industriais não recicláveis são necessárias para que, cada vez mais, a gestão adequada dos resíduos seja realizada. O coprocessamento na indústria do cimento é uma técnica que, se bem operada, é uma solução que reduz os impactos ambientais para destinação de resíduos.

## 2.2 COPROCESSAMENTO NA INDÚSTRIA DE CIMENTO

### 2.2.1 Histórico

O cimento é um material conhecido desde os antigos egípcios que utilizavam gesso calcinado como aglomerante. Os gregos e os romanos utilizavam solos vulcânicos que endureciam após a mistura com água. Estes materiais ajudaram a construir os imponentes monumentos egípcios, romanos como o coliseu, etc. (BATAGGIN, 2009).

O primeiro grande avanço na evolução do cimento foi em 1756 quando o inglês John Smeaton obteve um produto de alta resistência por meio de calcinação de calcários moles e argilosos. Porém a invenção do cimento é atribuída ao francês Vicat que em 1818 obteve resultados parecidos pela mistura de componentes argilosos e calcário (SNIC, 2003). Outro avanço ocorreu em 1824, quando o construtor Joseph Aspdin queimou pedras calcárias e argila em conjunto. Depois de moer até obter um pó fino percebeu que, após misturar com água e secar, se tornava com características semelhantes às das pedras utilizadas nas construções. Esta mistura foi patenteada no mesmo ano. Recebeu o nome de cimento Portland por possuir propriedades e características semelhantes às das rochas da ilha britânica de Portland (SNIC, 2003).

O conhecimento desta tecnologia chegou ao Brasil próximo ao ano de 1888. O comendador Antônio Proost Rodovalho construiu uma fábrica em Sorocaba-SP. Algumas outras fábricas também iniciaram nesta época. Porém, o grande marco da produção de cimento acabou acontecendo em 1924 com o surgimento da Companhia Brasileira de Cimento Portland em Perus-SP. Naquela época o país dependia do cimento importado (Bataggin, 2009). A produção do cimento nacional então foi crescendo até se tornar o 6º maior produtor mundial e o 4º maior consumidor do mundo (SNIC, 2011). O setor cimenteiro do Brasil é formado atualmente por 14 grupos industriais, com 80 unidades de produção espalhadas pelo país (ABCP(b), 2013).

O coprocessamento aparece paralelamente ao desenvolvimento do processo industrial do cimento. Na busca por combustíveis que trouxessem qualidade ao

cimento produzido e baixo custo, surgiram tentativas com vários tipos de resíduo. Registros mais antigos de tentativas com resíduos são do ano de 1974/76 em Saint Lawrence, Canadá; 1978 Ciment Français, Dèsvres França; 1979 Lafarge, Paulding Canadá (DALBON, 2011).

No Brasil o coprocessamento de resíduos iniciou na década de 90. Em 1990 em São Paulo, 1991 Minas Gerais / Paraná e 1992 no Rio de Janeiro. Atualmente o Brasil possui 37 fábricas licenciadas para o coprocessamento, distribuídas em praticamente todo o território. O sudeste possui a maior concentração com 17 fábricas operando com o uso de combustíveis de substituição (ABCP(b), 2013).

A falta de alternativa para os resíduos industriais perigosos também influenciou no crescimento da busca por opções ambientalmente e socialmente adequadas. Contexto que fez as indústrias pressionarem o desenvolvimento de técnicas para o coprocessamento. No Brasil existem 11 grandes incineradores com capacidade de apenas 80.750 ton/ano (CERQUEIRA E ALVES, 1999 e SANCHES, 2000). Estimou-se em 2011 que a capacidade de coprocessamento era de 2,5 milhões de toneladas ano (ABCP, 2013).

Na Alemanha o cimento Portland começou a ser produzido em 1850, quase 40 anos antes que no Brasil. Nesta época iniciaram 3 fábricas que foram se multiplicando ao longo dos anos. Em 1875 foram definidos os primeiros 17 critérios de qualidade do cimento, quando 29 fábricas produziam de 170 a 180 mil t/ano de cimento Portland. Em 1876 o cimento se associou ao setor de construção onde os padrões de qualidade foram então oficializados. Em 1882 teve início a associação dos produtores de cimento. Outras normas de qualidade foram sendo agregadas e com isso a qualidade e a resistência do material foi evoluindo. Em 1978 foi introduzida a norma nacional de cimento. Tempo em que o coprocessamento já estava sendo iniciado na Europa. E em 2002 foi estabelecida a norma européia de cimento, a EN 197-1, para os países membros (VDZ, 2002).

### 2.2.2 Processos Operacionais

A descrição dos processos operacionais nesta dissertação teve por base o livro de consultas do *Verein Deutscher Zementwerke* (VDZ), (associação das fábricas de cimento da Alemanha) (VDZ, 2002). O livro descreve o processo de forma completa e detalhada sendo aqui resumido para o nível necessário ao entendimento do trabalho.

A fabricação de cimento é um processo industrial que envolve várias etapas desde a retirada da rocha das minas, preparação da farinha, clínquerização, moagem, mistura com outros insumos até o ensacamento.

Existem 4 tipos principais de processos para a produção de clínquer: via úmida, semi-úmida, semi-seca e via seca. De uma forma resumida segundo Karstensen(2006) os quatro processos são:

- Processo via seca: a farinha crua seca é alimentada em um pré-aquecedor de ciclones, ou pré-calcinador, ou, em alguns casos, em um forno longo com pré-aquecedor interno de correntes.
- Processo semi-seco: a farinha crua seca é pelletizada com água e alimentada em um pré-aquecedor de grade móvel antes de ser alimentada no forno rotativo ou, em alguns casos, em um forno longo constituído de pré-aquecedores transversais internos.
- Processo semi-úmido: parte da água da pasta crua é retirada em filtros prensa. A torta do filtro resultante é, ou extrudada em *pellets* e alimentada no pré-aquecedor de grade móvel, ou alimentada diretamente em um secador de torta de filtros para a produção de farinha crua (seca) antes de entrar no pré-aquecedor/pré-calcinador do forno.
- Processo úmido: a pasta crua é alimentada diretamente em um forno longo rotativo equipado com um sistema interno de secagem/pré-aquecimento (processo úmido convencional) ou em um secador de pasta antes do pré-aquecedor/pré-calcinador do forno (processo úmido mais moderno).

Os processos úmidos e semi-úmidos e semi-secos são mais antigos e com o passar dos anos estão sendo substituídos pelos processos mais modernos. O



consumo energético é superior pois a farinha é obtida através de um processo de moagem na presença de água. Muita energia é necessária para a secagem da farinha antes de entrar no processo. A método via seca, por forno rotativo, é o mais utilizado, responsável por 93,8% do cimento produzido na Alemanha (VDZ, 2011) e 99% no Brasil (CNI/ABCP 2012). Por este motivo, este tipo de processo será detalhado neste trabalho.

O coprocessamento deve ser visto dentro de todo o processo de fabricação de cimento, pois se mal conduzido pode impactar a qualidade do produto final e a área do entorno. Os processos e as variações estão descritos e ilustrados na FIGURA 2 e serão detalhados neste trabalho.

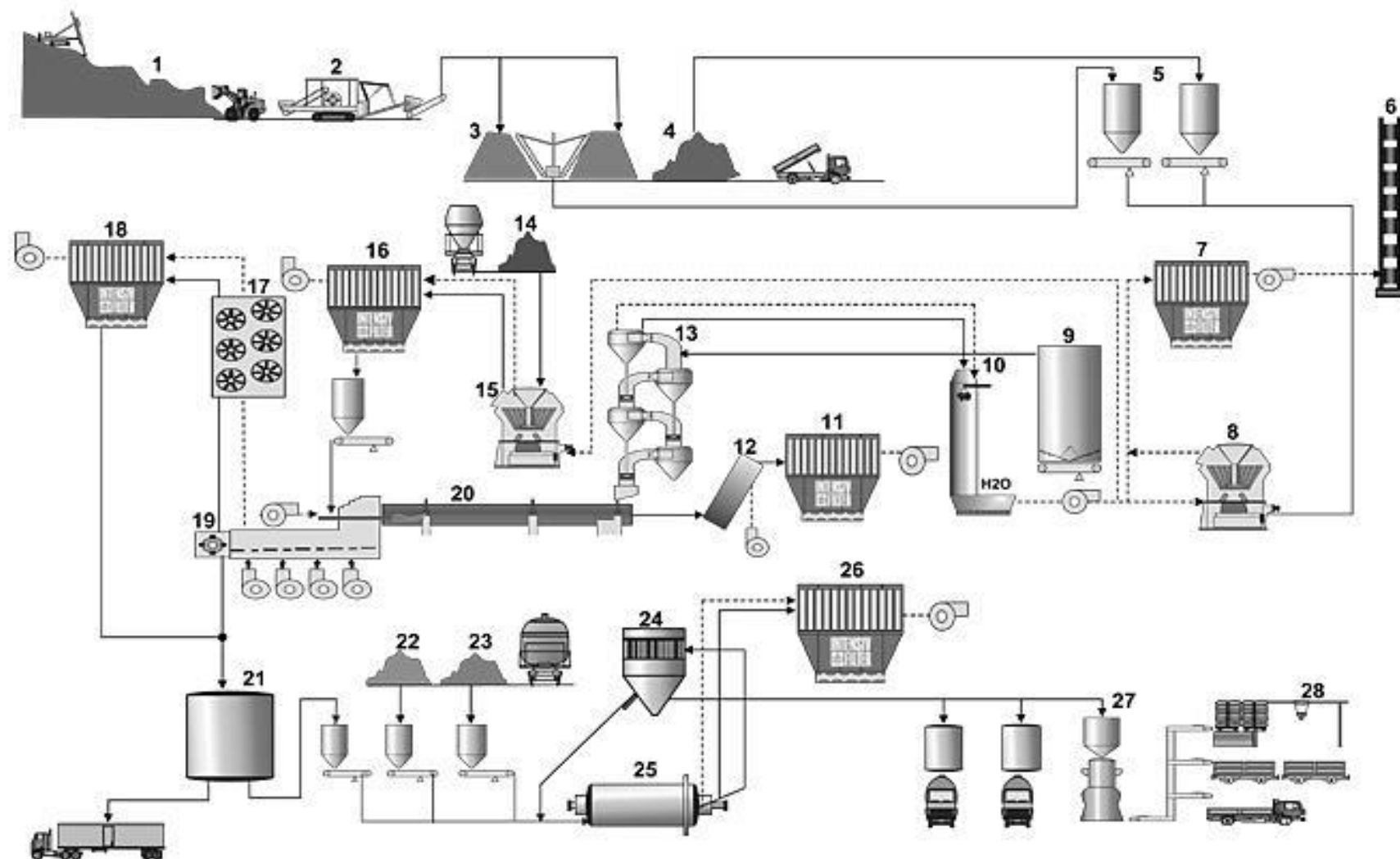


FIGURA 2 - PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CIMENTO  
 FONTE: HIMENVIRO (2013)

### Legenda da figura 2

- |   |  |
|---|--|
| 1. Jazida   | 15. Moinho vertical para carvão                  |
| 2. Britador   | 16. Filtro de mangas para moagem de carvão       |
| 3. Homogeneização da matéria prima                          | 17. Resfriador de gases tubular                  |
| 4. Agregados  | 18. Filtro de mangas do o resfriador de clínquer |
| 5. Silo de alimentação do moinho de farinha                 | 19. Resfriador de clínquer                       |
| 6. Chaminé  | 20. Forno rotativo                               |
| 7. Filtro de mangas para o forno e para o moinho de farinha | 21. Silo de clínquer                             |
| 8. Moinho de farinha  | 22. Gesso  |
| 9. Silo de farinha cru                                      | 23. Minerais                                     |
| 10. Torre de pré aquecimento                                | 24. Separador                                    |
| 11. Filtro para o by-pass                                   | 25. Moinho de cimento                            |
| 12. Câmara de mistura do by-pass                            | 26. Filtro de moagem de cimento                  |
| 13. Torre de pré aquecimento                                | 27. Silos de cimento e ensacadeira               |
| 14. Coque / Carvão  | 28. Paletização                                  |

#### 2.2.2.1 Extração da Matéria-Prima – Jazida e Britador

A base de fabricação do cimento é o clínquer, que é constituído a partir de aproximadamente 80% de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), 15% de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), 3% de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e quantidades menores de outros constituintes, como o ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), o enxofre, entre outros. Os óxidos possuem papel fundamental na qualidade da matéria-prima e suas concentrações são utilizadas para calcular a qualidade do clínquer, por isso estão presentes nos cálculos de indicadores importantes no processo.

O carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) vem de jazidas de calcário, argila ou na forma de marga, um tipo de rocha calcária com presença de argila. Estas matérias são retirados por explosões ou por quebra mecânica da rocha por equipamentos pesados. Para diminuir o custo com transporte, normalmente as fábricas são construídas nas proximidades do ponto de escavação.

Este material grosseiro é então britado até chegar em uma granulometria de 30 mm que segue para as pilhas de homogeneização. O triturador pode ser móvel ou estar locado próximo ao ponto de extração ou então em um ponto fixo.

Argila e marga podem ser exploradas apenas com escavadeiras ou grandes máquinas sem a necessidade de explosões.

A areia que fornece o  $\text{SiO}_2$  pode ser trazido de fontes mais distantes, assim como o minério de ferro, gesso e outros aditivos.

#### 2.2.2.2 Homogeneização da Matéria-Prima

Nesta etapa a matéria-prima retirada da jazida é misturada conforme a qualidade e a composição da área explorada. Algumas partes da rocha são de melhor qualidade que as outras, por isso a necessidade de mistura e de monitoramento da composição.

Este ponto é determinante para a qualidade do clínquer, pois a porcentagem de  $\text{CaCO}_3$  é definida. Variações podem trazer problemas para a qualidade do produto final. Análises contínuas são realizadas e, em algumas fábricas, amostradores automáticos fazem a coleta periódica de amostras e informam à central de controle da fábrica os parâmetros de composição.

Existem vários formatos para mistura e armazenamento deste material. Na maioria das vezes o material é colocado em camadas para que, no processo de alimentação, a mistura chegue homogênea. Normalmente o volume armazenado neste ponto é de uma semana de produção.(FIGURA 3)

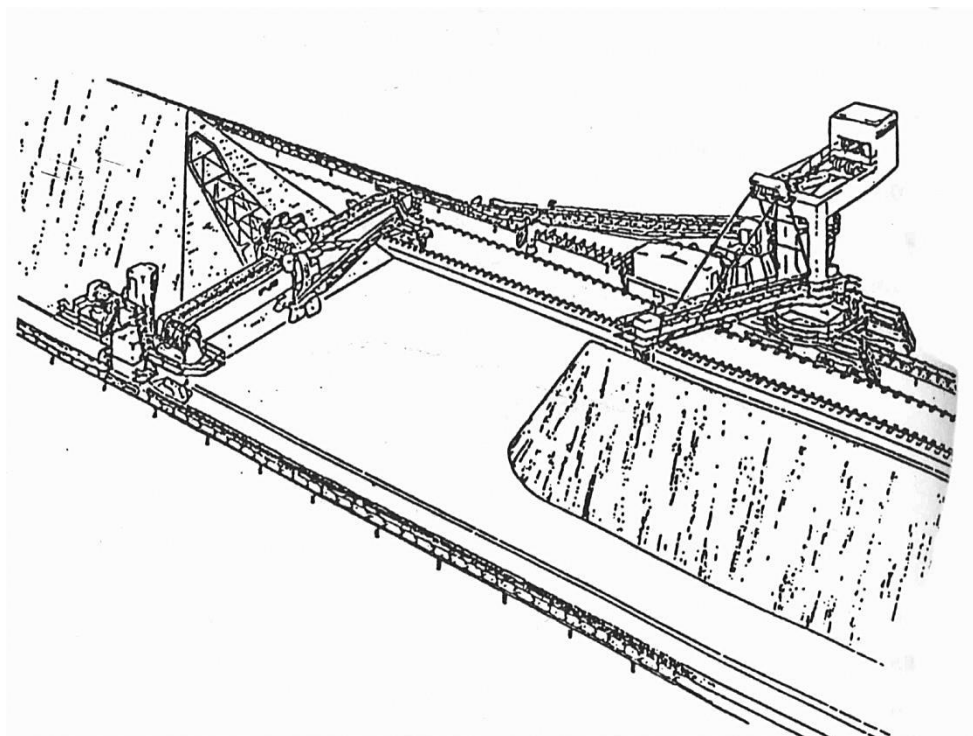


FIGURA 3– HOMOGENEIZAÇÃO  
FONTE: MATIAS E PEDROSO(2013)

A tecnologia destes leitos de mistura fazem com que as camadas sejam depositadas uma sobre a outra. Quando o material é retirado, para seguir no processo, ocorre a remoção de uma parte de cada camada de forma a favorecer uma mistura ideal.

#### 2.2.2.3 Moagem e Armazenamento – Moinho e Silo de Farinha Crua

A mistura é então encaminhada para secagem e moagem diminuindo a granulometria.

O material é moído na presença de ar quente que o seca. Existem alguns tipos de moinhos que podem ser utilizados. A FIGURA 4 ilustra 3 tipos comuns nas fábricas de cimento.

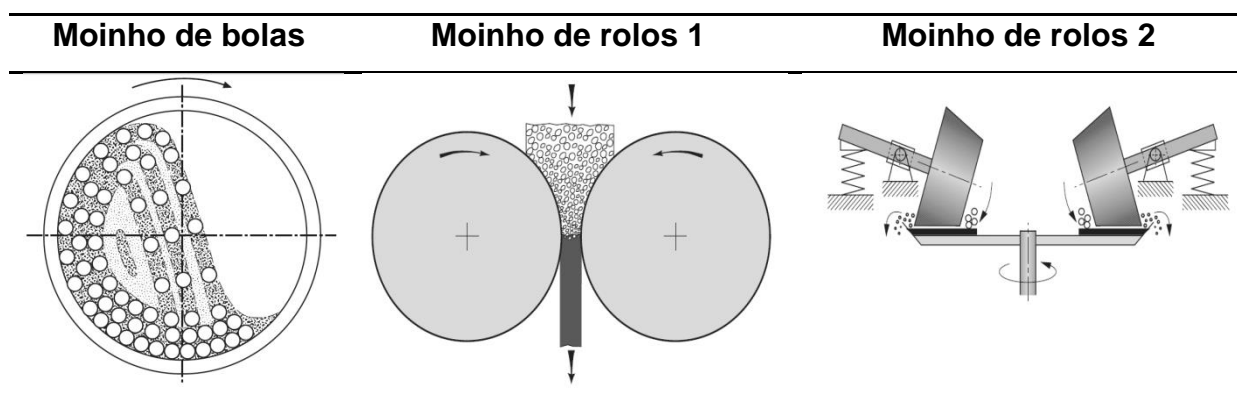


FIGURA 4 - EXEMPLOS DE MOINHOS  
FONTE: VDZ (2002)

Em comparação com a moinho de bolas, o moinho de rolos é mais eficiente na moagem, aceita materiais mais grosseiros, emite menos ruído e é mais fácil de ser instalado. Sendo energeticamente mais eficiente, o moinho de rolos está sendo empregado na maioria das fábricas novas. Em algumas situações emite também menos pó. Estes equipamentos podem processar até 500 t/h de farinha crua (VDZ, 2002).

Conforme a qualidade do material, no leito de mistura são dosados outros materiais de maior qualidade ou corretores, como areia e minério de ferro. A alimentação é determinada pelo tipo de clínquer e a mistura desejada pela produção.

Em algumas fábricas alguns resíduos de substituição são inseridos neste ponto para obter a mistura.

A composição básica da farinha é  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e são representados genericamente pelos símbolos C, S, A e F, respectivamente. Em menor quantidade são encontrados vários compostos secundários ( $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ), e outros, tais como o S, na forma de sulfatos e sulfetos,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , F, Cl, Cr etc., que devido suas baixíssimas proporções são denominados componentes minoritários.

No controle da qualidade da verificação da composição da farinha são utilizados três indicadores principais: Fator de Saturação de Cal (FSC), Módulo de Sílica (MS) e o Módulo de Alumina (MA).

O material moído é encaminhado para os silos de farinha crua que será posteriormente encaminhado para o processo de clinquerização.

#### 2.2.2.4 Ciclones –Torre de Pré-Aquecimento

É o processo de ciclones sequenciais que é utilizado para dar entrada da farinha crua no forno. É o mais utilizado pela eficiência energética e pela capacidade de processamento da matéria-prima. São 4 a 6 estágios de ciclones em cascata com alturas de 50 até 120 metros.

Os ciclones são alimentados pela farinha crua na parte superior e os gases do forno sobem no contrafluxo aquecendo o material. Na passagem pelos primeiros ciclones a farinha é mais uma vez seca e a turbulência gerada faz deste sistema favorável para a troca de calor entre a farinha e os gases. O processo se repete a cada ciclone e a farinha aumenta cada vez mais de temperatura.

A temperatura de saída do gás na parte superior do primeiro ciclone é de 280 até 350°C, e no ciclone próximo ao forno cerca de 830°C. Uma pequena parte da calcinação já é efetuada neste processo, mas a maior parte é realizada no pré-calcinador ou queimador secundário e/ou no forno.

#### 2.2.2.5 Pré-Calcinador- Torre de Pré-Aquecimento

Nem todas as fábricas possuem o pré-calcinador no processo, que é mais uma medida para ganho de eficiência energética e de volume de produção em

fábricas modernas. O pré-calcinador é uma câmara especial localizada entre o pré-aquecedor, formado pela torre de ciclones, e o forno rotativo. Neste local podem ser queimadas quantidades de combustível da ordem de 60% do combustível total. Neste ponto é favorável a queima de resíduos como combustíveis de substituição com menor poder calorífico, pois a temperatura exigida não é tão alta, entre 830 e 950°C. Este processo existe para que o material entre no forno rotativo quase totalmente calcinado.

Para que o processo ocorra de forma adequada e o consumo de energia seja menor, pode ser utilizada uma entrada de ar terciário vindo da grelha de resfriamento do clínquer. Assim o ar comburente alimentado entra com temperaturas mais altas aumentando a eficiência da queima.

#### 2.2.2.6 Forno e Produção do Clínquer – Torre de Pré Aquecimento, Resfriador de Clínquer, Forno

Saindo do último ciclone, o material passa então para o forno rotativo que está a uma temperatura aproximada de 1000°C. Possui diâmetros de até 6 metros com rotações de 1,3 até 3,5 por minuto. Pela rotação e pela ligeira inclinação, que pode ser de 2,5 até 4,5%, o material se movimenta dentro do forno. O comprimento do forno varia de 10:1 até 38:1 na proporção comprimento/diâmetro, chegando em alguns casos a mais de 200m com até 4 anéis de rotação. Os fornos atuais são construídos nas proporções de 10:1 até 17:1 e rotacionam sobre dois eixos.

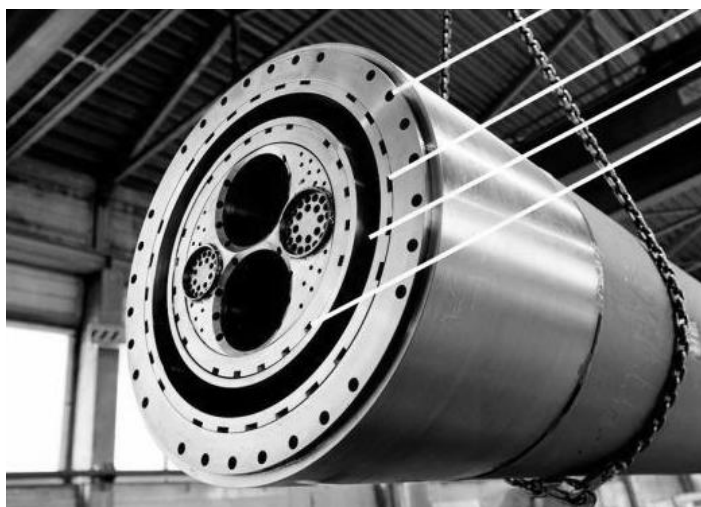


FIGURA 5- MAÇARICO  
FONTE: ZKG (2013)

A FIGURA 5 apresenta um exemplo de maçarico que é responsável por alimentar o forno com o combustível. Existem vários modelos, as camadas e dutos de alimentação dependem do tipo de combustível utilizado. Entre as camadas existem espaços para a passagem de ar para resfriamento do maçarico.

A temperatura do clínquer no ponto de saída é de 1450°C, mas os gases chegam a 2000°C na chama do maçarico. O tempo necessário para que o material passe pelo forno é de 20 a 40 minutos.

A FIGURA 6 é um exemplo de perfil de temperatura do forno com o tempo de retenção do material e do ar.

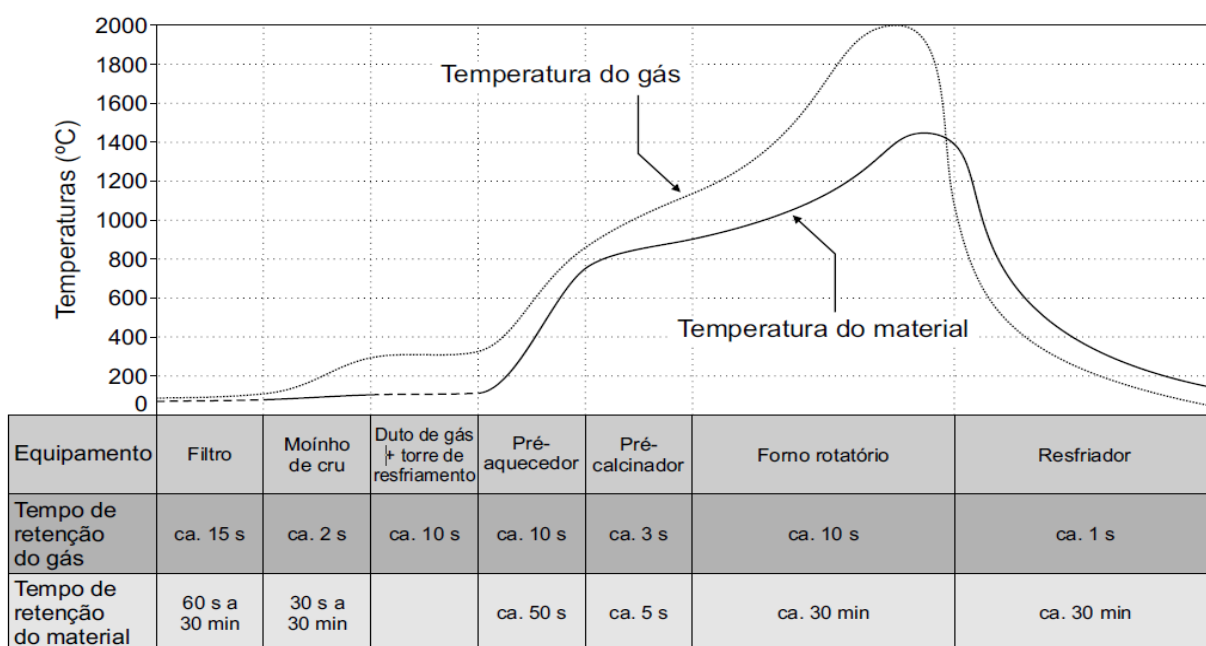


FIGURA 6 - PERFIL DE TEMPERATURA DOS GASES E DO MATERIAL EM UM SISTEMA DE FORNO COM CICLONES  
FONTE: CEMBUREAU (1999)

O ar comburente para a chama principal vem do resfriamento do clínquer e possui temperaturas de 600 a 1000°C, é chamado ar secundário. Apenas um pequeno volume de ar, entre 6 e 13%, é soprado diretamente para o forno, chamado de ar primário.

Os fornos são revestidos na parte interna por materiais refratários para que a perda de calor seja menor e para que a parede do forno seja preservada por um período mais longo.

O clínquer é resultado da passagem da farinha crua por um forno com a temperatura superior a 1400°C. Na saída deste processo, os materiais formam ligações chamadas fases de clínquer. São silicatos de cálcio e cálcio aluminatos que



dão ao cimento as características e propriedades no endurecimento, na presença de água.

Durante todo o processo ocorrem diferentes reações químicas, parte delas em sequência, outras paralelamente. A energia necessária para o processo é calculada por meio da entalpia destas reações. Se sobrepõem as energias das reações endotérmicas e exotérmicas.

Nas temperaturas próximas a 200°C é evaporada a água livre, e entre 100 e 400°C é liberada a água adsorvida pela argila. Entre 400 e 750°C a água ligada quimicamente é liberada e ocorre a desidratação.

As reações básicas no processo de fabricação podem ser divididas em quatro etapas:

1. Todo o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e parte do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  existente no processo se combinam com o CaO disponível no processo para formar ferro-aluminato tetracálcico:  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  genericamente escrito C4AF ou Ferrita.

2. Todo o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  remanescente da reação anterior, se combina com o CaO disponível no processo para formar aluminato tricálcico:  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  genericamente escrito C3A ou aluminato.

3. Todo o  $\text{SiO}_2$  presente no processo se combina com o CaO disponível no processo para formar silicato dicálcico:  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  genericamente escrito C2S ou chamado Belita.

4. Posteriormente o composto formado na reação anterior, reage com mais CaO disponível no processo para formar silicato tricálcico:  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{CaO} = 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  genericamente escrito C3S ou chamado Alita.

A decomposição da farinha crua para CaO e  $\text{CO}_2$  acontece na presença de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , iniciando a temperaturas de 550 até 600°C e transcorre até 900°C de forma rápida, chamado de calcinação. Conforme a temperatura aumenta, várias reações ocorrem paralelamente formando C2S assim como outros óxidos intermediários que são novamente decompostos quando a temperatura chega no ponto de fusão a 1280°C. Quando a temperatura alcança os 1450°C o  $\text{C}_2\text{S}$  reage com o CaO e forma o C3S.

No resfriamento é formado novamente o Tricalcioaluminato (C3A) e o Calcioaluminatoferrico C2(A,F). Finalmente, na temperaturas entre os 850 e os 1250°C dá-se a reação entre o óxido de cálcio e as substâncias silico-aluminosas, com a formação do produto final: o clínquer, constituído por silicatos di-cálcicos

( $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ), aluminatos tri-cálcicos ( $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e ferro-aluminatos tetra cálcicos ( $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Este último processo denomina-se sinterização.

A FIGURA 7 ilustra as fases de formação do clínquer com a variação das temperaturas conforme descrito acima.

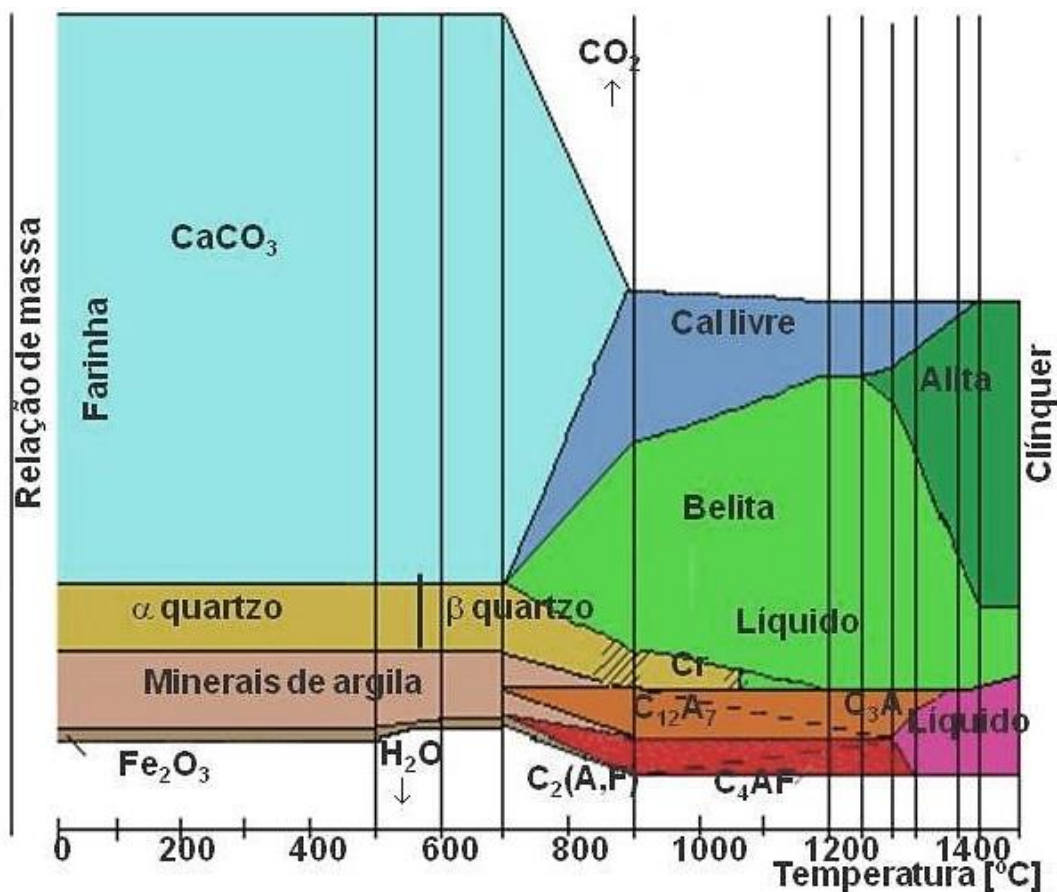


FIGURA 7 - FASES DO CLINQUER  
FONTE: FARENZENA (2011)

Podemos verificar na FIGURA 7 que nas temperaturas próximas a 800°C é onde começam as mudanças. Neste ponto a matéria-prima está na última fase de ciclones ou entrando no pré-calcinador. Conforme a temperatura sobe as reações ocorrem, e quando a temperatura passa dos 1200°C subindo para 1400°C próximo ao maçarico verificamos outro ponto de grandes mudanças, quando a alita (C<sub>3</sub>S) é formada. O líquido indicado em roxo, após o resfriamento, retorna a forma de aluminato (C<sub>3</sub>A) e ferrita (C<sub>4</sub>AF).

#### 2.2.2.7 By-Pass

Atualmente o sistema mais moderno e mais utilizado nas fábricas de cimento que realizam o coprocessamento é composto por: pré-aquecimento por ciclones, *by pass*, pré-calcinador com ar terciário, forno rotativo e resfriador por grelhas.

Pelas altas temperaturas no final do forno algumas substâncias são formadas ou volatilizadas. Estas substâncias, quando carregadas pelo fluxo de ar para regiões de menor temperatura, condensam novamente formando um ciclo e aumentando a concentração por acumulação no processo.

Cloro, sulfetos e cloretos de sódio e potássio se volatilizam e condensam quando chegam a temperaturas próximas a 800°C. Nestes pontos podem encrustar nas paredes trazendo uma alteração no processo, podendo até parar a produção para que se façam medidas de desencrostamento (FORMOSINHO e CAVALEIRO, 2000).

Na FIGURA 6 verificamos as altas temperaturas no maçarico e a redução da temperatura nos pré-calcinadores e ciclones produzindo o ambiente favorável para este ciclo de volatilização e condensação.

Para que este ciclo seja interrompido é feita uma saída alternativa para uma parte dos gases, chamada de *by-pass*, que possibilita a saída de parte dos gases junto com parte do material, objetivando que seja retirada do circuito uma fração destes voláteis.

Nos fornos mais curtos, com pré-aquecedor e/ou com com pré-calcinador, estes equipamentos são instalados entre a entrada do forno e os ciclones onde 2 a 30% dos gases são desviados para um sistema de despoeiramento separado conforme ilustrado na FIGURA 8. Para fornos longos o *by-pass* é instalado em um ponto que não permita que esta fração chegue até a zona onde ocorre a calcinação. (FORMOSINHO/PIO, 2000) Modelos atuais desviam de 2 a 8%, sem oferecer perda térmica significativa, que podem chegar a 1,5- 2,0 kcal/kg clínquer por porcentagem desviada (FLSMIDTH, 2008).

O *by-pass* foi desenvolvido e é usado principalmente em fábricas que usam combustíveis alternativos, e/ou matérias-primas, e/ou combustíveis com alto teor de cloro. Pelo custo de instalação, operação e perda de material, esta etapa é evitada

por algumas fábricas. Porém, nestes casos, o controle das matérias-primas e dos combustíveis deve ser maior.

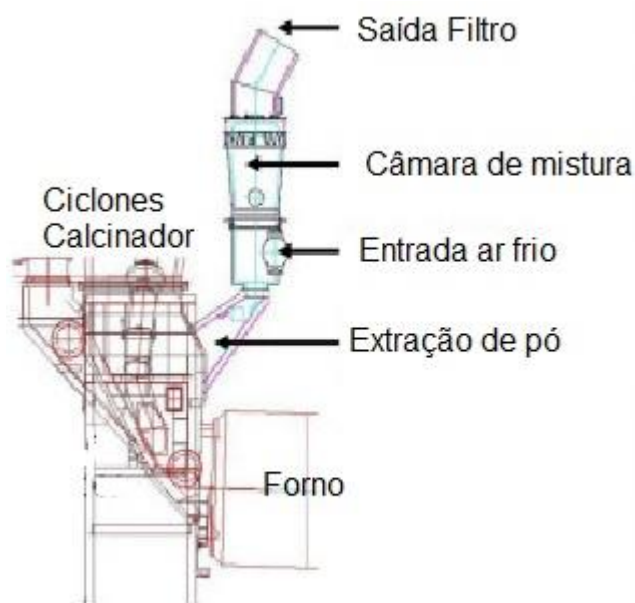


FIGURA 8 - BY PASS  
FONTE: KHD (2013)

#### 2.2.2.8 Resfriamento e Armazenamento Temporário – Resfriador de Clínquer e Silo de Clínquer

O clínquer sai do forno em altas temperaturas próximas a  $1.400^{\circ}\text{C}$  e deve ser arrefecido. Esta etapa pode ser realizada por diferentes sistemas.

O sistema de fornos satélites é composto por tubos presos tangencialmente ao lado e ao redor do final do forno rotativo, normalmente de 9 até 11 tubos. O clínquer, ao sair do forno, cai nestes tubos e é rapidamente arrefecido por um fluxo de ar oriundo do exterior. O ar aquecido é encaminhado para o forno onde é utilizado como ar comburente e como fonte de energia térmica para o processo de clínquerização. Pela impossibilidade de extração de ar terciário, este tipo de forno não é adaptável à câmaras de pré-calcinação.

Outro sistema pouco utilizado é o resfriador monocular, que consiste em um tubo de grandes dimensões, com pás no seu interior que, rotacionado, movimenta o clínquer. O fluxo de ar no seu interior resfria o material até a temperatura de  $200^{\circ}\text{C}$ .

Para o sistema monocular e satélite, apenas a quantidade de ar necessária como ar comburente pode ser sugada, impactando no arrefecimento. Nestes casos pode ser necessário mais um sistema complementar de resfriamento do clínquer.

O sistema de grades, composto por grade móveis ou fixas é o mais utilizado. O clínquer cai quente do fim do forno sobre a grade e é transportado por movimento das grades ou de pratos transportadores e ao mesmo tempo arrefecido por um fluxo de ar frio contrário ao fluxo do clínquer. A zona de resfriamento geram ar aquecido que é utilizado. O ar mais quente é chamado ar secundário, e é utilizado como ar comburente na entrada do forno. O restante pode ser utilizado como o ar terciário no pré-calcinador. Outra parte pode ser direcionada ao processo de secagem de matéria-prima. O excedente, normalmente menos aquecido por ser captado do final da grelha, é encaminhado para o exterior após passar pelos filtros. Este sistema permite que o ar secundário entre no forno com temperaturas entre 1000 e 1100°C e o clínquer é resfriado a temperaturas entre 80 a 200°C.

Buscando maior eficiência energética, atualmente as plantas tem buscado utilizar todo ar quente. Desde a secagem da farinha, areia, carvão e combustíveis secundários úmidos até em novos projetos de geração de energia, vapor e água quente.

#### 2.2.2.9 Moagem com Aditivos e Estocagem – Gesso, Minerais, Separador, Silos de Cimento e Ensacadeira

O clínquer resfriado é então encaminhado para o depósito de clínquer que normalmente é fechado de forma a evitar emissões de pó. É composto de pós finos até grãos de 50mm de diâmetro.

Conforme a necessidade comercial o clínquer é enviado junto com aditivos para o moinho. Pela diferença de propriedades dos materiais a serem moídos, algumas fábricas possuem moinhos separados para aditivos, que seguem para um misturador. Os aditivos podem ser gesso, escórias siliciosas, farinha do *by-pass*, cinzas entre outros dependendo da necessidade e da disponibilidade local.

Os moinhos utilizados são do mesmo tipo usados para a preparação da farinha crua. Existem vários tipos de cimento desenvolvidos para diferentes aplicações e características.

O cimento é um pó fino com partículas de 50µm em média. O cimento mais conhecido vem da mistura de 96% de clínquer e 4% de gesso.

O produto pronto é então encaminhado para os silos de estocagem e pode ser direcionado para o processo de ensacamento ou carregado a granel por caminhões especialmente preparados.

### 2.2.3 Combustíveis de Substituição e Matérias-Primas de Substituição

A palavra utilizada no alemão para o coprocessamento é ainda mais auto explicativa: “Mitverbrennung”, que traduzindo literalmente significa queimar-junto. É a queima de algum produto ou resíduo que pode substituir o combustível ou a matéria prima de um processo de produção.

No Brasil, a palavra coprocessamento normalmente se refere à destruição térmica do resíduo pelo uso do resíduo como matéria-prima e/ou como combustível de substituição em processos de fabricação de cimento nos fornos de produção de clínquer. Segundo a CONSEMA (2000), a aplicabilidade do coprocessamento pode ser para resíduos substitutos de matérias-primas, substitutos de combustível e resíduos inorgânicos para inertização. Outro termo encontrado na literatura é co-incineração que se refere à destruição de resíduos sem a recuperação energética. Para este trabalho utilizamos o termo coprocessamento da mesma forma que a legislação que engloba todos os tipos de queima de resíduos em fornos de cimento.

A fabricação de cimento é um processo de grande consumo de energia que, dependendo da variação dos preços e disponibilidade, pode chegar entre 30 e 50% do custo total de produção (CARVALHO *et al.*, 1996). A energia térmica é utilizada em vários processos: no forno, secagem da matéria prima, da farinha crua, secagem de areia, secagem de carvão, secagem de lodo, secagem de combustíveis de substituição, entre outras possibilidades (VDZ, 2012). Utilizar combustíveis de substituição se torna, então, algo muito interessante para a competitividade comercial/econômica. Reduzir custos é algo essencial para atingir metas de lucratividade e se manter no mercado competitivo. Maringolo (2001) apresenta em seu estudo ganhos consideráveis (milhões de reais) na substituição de apenas 15% dos combustíveis.

Segundo a RCM (2000) dependendo do processo, há a possibilidade de uso para valorização energética quando o poder calorífico alcança valores mínimos entre 5-10 MJ/kg.

Segundo Carvalho *et al.* (1996), fornos rotativos de cimento são considerados muito versáteis, por serem capazes de incinerar e utilizar muitos tipos de resíduos ou combustíveis de baixo poder calorífico, desde que respeitados os padrões de qualidade de produção.

Segundo a CONSEMA (2000), o resíduo utilizado não deve alterar a qualidade técnica, ambiental e de segurança ocupacional do cimento, não podendo agregar substâncias ou elementos em quantidades que afetem os padrões. Além disso, deve ser fornecido de forma regular para que o processo possa ser adaptado.

Os anos de evolução da tecnologia de coprocessamento permitem a utilização de resíduos sólidos, líquidos ou gasosos para alimentar os fornos de cimento adaptados. Segundo Carvalho *et al.* (1996), Erbe e Andrade (1996) alguns fatores são determinantes para que estes resíduos possam ser utilizados e a fábrica local se adapte ao tipo de resíduo de substituição disponível.

São estes os fatores:

- Quantidade disponível. – Este fator é de extrema importância, pois os fornos funcionam continuamente e demandam de uma regularidade de alimentação de resíduos para que a temperatura e as características de chama sejam constantes. Variações no tipo de combustível utilizado podem trazer instabilidade ao forno podendo impactar no produto final.
- Uniformidade – Ligada ao item anterior, pois se o resíduo for muito heterogêneo a qualidade da chama e a temperatura alteram o comportamento do forno. Um fator importante é o poder calorífico, pois a energia no forno deve ser fornecida de forma constante. Resíduos podem possuir grande variação e por isso devem ser homogeneizados na sua preparação e/ou estocagem.
- Composição e presença de materiais traço – Concentrações de produtos danosos à qualidade do produto ou que alterem o nível de emissões atmosféricas devem ser controlados. Pois, além de afetar a composição do clínquer ou interferir nas emissões, podem exigir insumos e ou processos extras aumentando o custo da produção.

Alguns casos de problemas com concentrações de combustíveis secundários, ou traços são citados por Carvalho *et al.* (1996):

- Metais pesados – Pouco interferem na qualidade do produto, porém são quase inteiramente combinados no clínquer estando presentes no produto final.
- O ferro e o manganês interferem na coloração do clínquer interferindo na qualidade do produto.
- Enxofre e cloro podem gerar crostas e arcos dentro do forno interferindo no escoamento do material. Efeito que pode ser potencializado pelo resíduo, mas pode ser amenizado pelo *bypass* descrito no capítulo anterior.
- Materiais com alto teor de cinzas podem interferir nas propriedades físicas do clínquer e na sua reatividade hidráulica. Fatores que devem ser compensados na mistura do cimento ou na utilização de uma farinha crua com maior porcentagem de  $\text{CaCO}_3$ .

Resíduos com alta concentração de alumínio, muito comuns em CDR's, podem gerar pequenas bolhas no processo de mistura e cura do cimento expandindo toda a massa, interferindo nas propriedades físicas e gerando problemas na aplicação.

O combustível desempenha um papel muito importante no processo de fabricação do cimento. Por isso várias características são monitoradas e consideradas tanto em resíduos como em combustíveis tradicionais, entre elas estão (CARVALHO *et al.*, 1996):

- Voláteis na matéria prima e nos combustíveis
- Características da chama
- Conteúdo de cinzas e composição dos combustíveis
- Correlação cru-cinza-clínquer.

A preparação do combustível de substituição é um fator importante na avaliação para uso. Dependendo da origem do resíduo ele deve ser preparado para o uso no forno. Podem passar por processos de diminuição de granulometria, secagem, estocagem e/ou misturados com outros produtos. Cada um destes detalhes é importante e representa um custo e tecnologia impactando viabilidade de uso.



Problemas operacionais também devem ser considerados, como a formação de crostas no forno, variação de temperatura interna, variação no volume de cinzas, impacto sobre o revestimento refratário do forno, interferência nas características de moagem do clínquer, características de alimentação do forno entre outros.

Existem vários parâmetros do cimento que são definidos dependendo do seu uso. Estes padrões devem ser mantidos para assegurar a qualidade do produto e por isso são monitorados. Como o combustível é misturado com a matéria-prima, estes parâmetros podem ser influenciados. Como exemplo, a geração de cinzas dos resíduos é normalmente maior que a de combustíveis comuns, portanto a massa de cinza no clínquer é maior.

A TABELA 2 mostra os resíduos mais utilizados para o coprocessamento na Alemanha. Pode-se verificar que o maior volume são os resíduos indústrias 53,7%, sendo que alguns outros resíduos listados também são gerados em indústrias, como solventes(3,4%), óleos usados (2,2%), e alguns lodos de ETE (9,9%). Estes dados mostram a importância desta tecnologia para destinação de resíduos industriais.

Resíduos domiciliares também possuem uma boa representatividade (11%), evidenciando o potencial deste resíduo como combustível de substituição.

TABELA 2 - USO DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS NA ALEMANHA

Resíduo	1000 t/ano	%
<b>Pneus</b>	286	9,3%
<b>Óleo usado</b>	66	2,2%
<b>Resíduos industriais:</b>		
• <b>Indústria de Papel</b>	63	2,1%
• <b>Plástico</b>	474	15,5%
• <b>Indústria têxtil</b>	10	0,3%
• <b>Outros</b>	1096	35,8%
<b>Gorduras e farinha de animais</b>	187	6,1%
<b>Resíduo domiciliar preparado</b>	336	11,0%
<b>Madeira</b>	8	0,3%
<b>Solventes</b>	104	3,4%
<b>Lodos de ETE</b>	304	9,9%
<b>Outros</b>	125	4,1%
<b>TOTAL</b>	<b>3.059</b>	

Fonte: VDZ(2012)

A FIGURA 9 apresenta os resíduos por tipo de indústria. Pode-se verificar que a indústria química possui uma maior variedade de possíveis resíduos para

coprocessamento. Também verifica-se que essa tecnologia pode atender uma vasta gama de setores industriais.

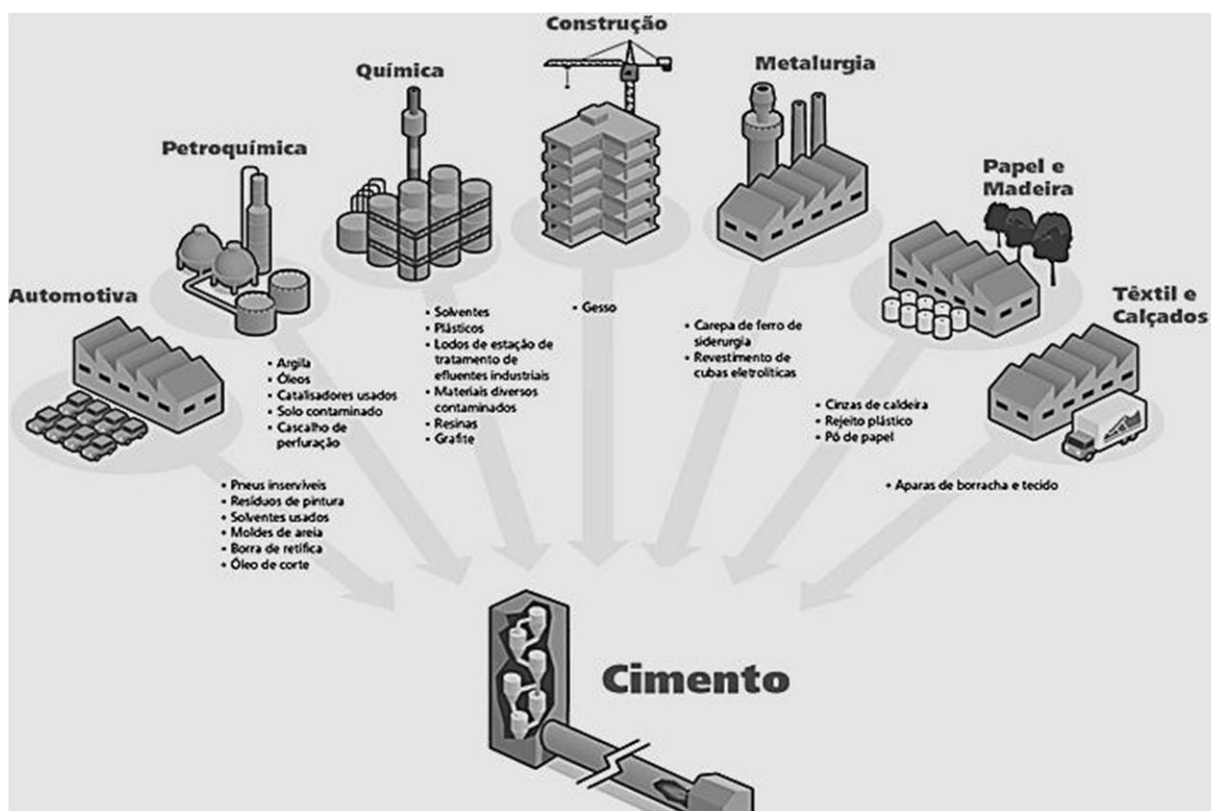


FIGURA 9 - ORIGEM DE RESÍDUOS PARA USO NO COPROCESSAMENTO  
FONTE: VOTORANTIM (2013)

A TABELA 3 apresenta alguns exemplos de resíduos utilizados como combustíveis de substituição. Alguns resíduos serão detalhados neste trabalho para verificação e exemplificação das características necessárias para o uso.

TABELA 3 - PODER CALORÍFICO DE COMBUSTÍVEIS DE SUBSTITUIÇÃO

Combustíveis de substituição	Poder Calorífico médio (kJ/Kg)
<b>Coque</b>	35.000
<b>Pneus</b>	25.830
<b>Óleo usado</b>	34.350
<b>Resíduos da indústria do papel</b>	20.000
<b>Plástico</b>	22.180
<b>Embalagens</b>	22.180
<b>Resíduos da indústria têxtil</b>	20.090
<b>Combustível derivado do resíduo – (CDR)</b>	22.880
<b>Farinha animal e gorduras</b>	22.700
<b>Resíduo sólido urbano</b>	15.860
<b>Madeira</b>	13.350
<b>Solventes</b>	24.500
<b>Resíduos de tapete</b>	20.000
<b>Lodos de ETE – 23% de umidade</b>	11.000

FONTE: UBA (2006)

### 2.2.3.1 Resíduos da Agricultura

Os resíduos da agricultura possuem um grande potencial de utilização em fornos, pois além de existirem em grandes quantidades e serem de certa forma homogêneos, são constituídos basicamente de carbono, oxigênio e hidrogênio. São resíduos provenientes da atividade agrícola ou do processamento de alimentos. Normalmente são polpas, talos, e restos de frutas e vegetais, ricos em celulose, hemicelulose, lignina, resina, cinzas, ceras, óleos e misturas solúveis em água. Outros elementos em menor quantidade também estão presentes como o nitrogênio, enxofre, cloro e traços de outros. Normalmente existe muita umidade e, portanto 60-70% da matéria é volátil.

Resíduos com alto teor de óleos, resinas e ceras aumentam o poder calorífico os tornando melhores. Em contra partida, algum dos resíduos agrícolas geram muitas cinzas, o que reduz seu poder calorífico.

Alguns exemplos de resíduos potenciais com seu poder calorífico superior (PCS) são: Casca de arroz - 18 MJ, pó de bambu da indústria de papel, resíduos de côco – 11,6 MJ, melão, casca de nozes, talos e podas, casca de algodão, casca de feijão - 16,7 MJ, casca de mandioca - 13,7 MJ, sabugo de milho - 17MJ, etc. (PAES FILHO *et al.* (2012).

PAES FILHO *et al.* (2012) identificou que os custos de uso deste tipo de material dependem diretamente da distância dos geradores até o ponto de utilização destes materiais.

Para os estados de Minas Gerais e São Paulo alguns destes resíduos são autorizados na licença de operação e não necessitam de licenciamento específico. São eles: casca de arroz, serragem de madeira não tratada, bagaço de cana de açúcar, palha de arroz, casca de acácia, trigo e similares conforme a resolução CONSEMA 02/2000 e bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz e similares; e resíduos vegetais provenientes da indústria de transformação de produtos alimentícios, como cascas, bagaços de cítricos, cítricos utilizados para extração de óleos essenciais, etc., conforme norma técnica P4.263 da CETESB.

Segundo o estudo setorial da CNI e ABC o Brasil também é o país que mais utiliza biomassa (considerada carbono neutra) na produção de cimento (CNI e ABCP, 2012).

#### 2.2.3.2 Lodos De Estação De Tratamento De Esgoto

O lodo quando seco, em forma de pó, pode ser utilizado como combustível e é relativamente fácil de ser usado e estocado. Mas normalmente não é enviado seco para as fábricas de cimento, pois a secagem não é viável economicamente.

Lodos úmidos também são utilizados em fornos de cimento, mas são tratados como matéria-prima de substituição.

Os lodos possuem alta porcentagem de  $P_2O_5$  que interfere na qualidade do cimento. Por isso têm seu uso limitado (CARVALHO, 1996).

Lodos também possuem uma grande gama de componentes. Dependendo da origem dos efluentes que a estação de tratamento trata. Na Alemanha normalmente os sistemas de tratamento tratam efluentes industriais e domésticos o que amplia ainda mais a variação de elementos encontrados.

Podem ser encontrados: arsênio, cádmio, cobalto, cromo, cobre, mercúrio, manganês, chumbo, níquel, zinco, etc., e traços que são fixados no clínquer. As concentrações destes metais são controlados na qualidade do cimento produzido. Conforme descrito no capítulo de impactos ambientais.

#### 2.2.3.3 Borracha

Pneus e lascas de borracha são utilizados em larga escala em fornos de cimento. A tecnologia já é dominada e difundida em todo mundo.

Possuem um alto poder calorífico (20.900 – 37.600 kJ/kg) e por isso são altamente recomendados como combustíveis de substituição.

Além disso, possui 15% de ferro no aço estrutural do pneu que reduz a necessidade de adição de ferro no processo (VDZ, 1996).

#### 2.2.3.4 Plástico e Combustível Derivado do Resíduo(CDR)

Plásticos e embalagens são resíduos comuns e de grande volume nas indústrias e nos domicílios, podendo ser recicláveis ou não. Atualmente no Brasil apenas os resíduos industriais são utilizados como combustíveis de substituição. Os de origem domiciliar não são utilizados, pois o custo é muito superior à destinação em aterros e lixões.

A legislação brasileira só permite que resíduos domésticos sejam destinados para coprocessamento após preparo e triagem, retirando os resíduos orgânicos.

Na Alemanha boa parte do combustível de substituição vem de resíduos domésticos não recicláveis. O resíduo destinado para o aproveitamento térmico é rejeito do processo de reciclagem do resíduo domiciliar. Os resíduos orgânicos, vidros e papéis não entram nesta mistura.

Os resíduos desta natureza devem passar por um processo até que se tornem o combustível derivado do resíduo (CDR). Primeiro devem ser separados na origem, para que os resíduos recicláveis, orgânicos e perigosos sejam destinados de forma correta. Após a coleta o material é novamente selecionado na central de resíduos do município ou da empresa blendeira<sup>2</sup> para retirada de materiais impróprios como materiais recicláveis ou que danifiquem os trituradores. O material é então triturado para reduzir o tamanho dos pedaços e misturado para que seja mais homogêneo. Se necessário ainda passa por um processo de secagem e então pode ser embalado ou armazenado (GENDEBIEN, 2003).

Galenkempper (2000) identificou que na preparação do CDR muitos resíduos potencialmente perigosos são separados. Fazendo com que resíduos perigosos, que seriam encaminhados para aterros sanitários, serem adequadamente destinados. A FIGURA 10 abaixo mostra a comparação de contaminantes traço no resíduo não reciclável da coleta seletiva na Alemanha e no CDR produzido após separação. Verifica-se uma diminuição significativa em vários contaminantes destacando se o chumbo e o mercúrio.

---

<sup>2</sup>Empresa responsável pela preparação dos resíduos antes do envio para a cimenteira. Dependendo das características físico químicas, os resíduos, quando necessário, são triturados, peneirados, secos e misturados para que atendam a qualidade necessária para a utilização nos fornos.

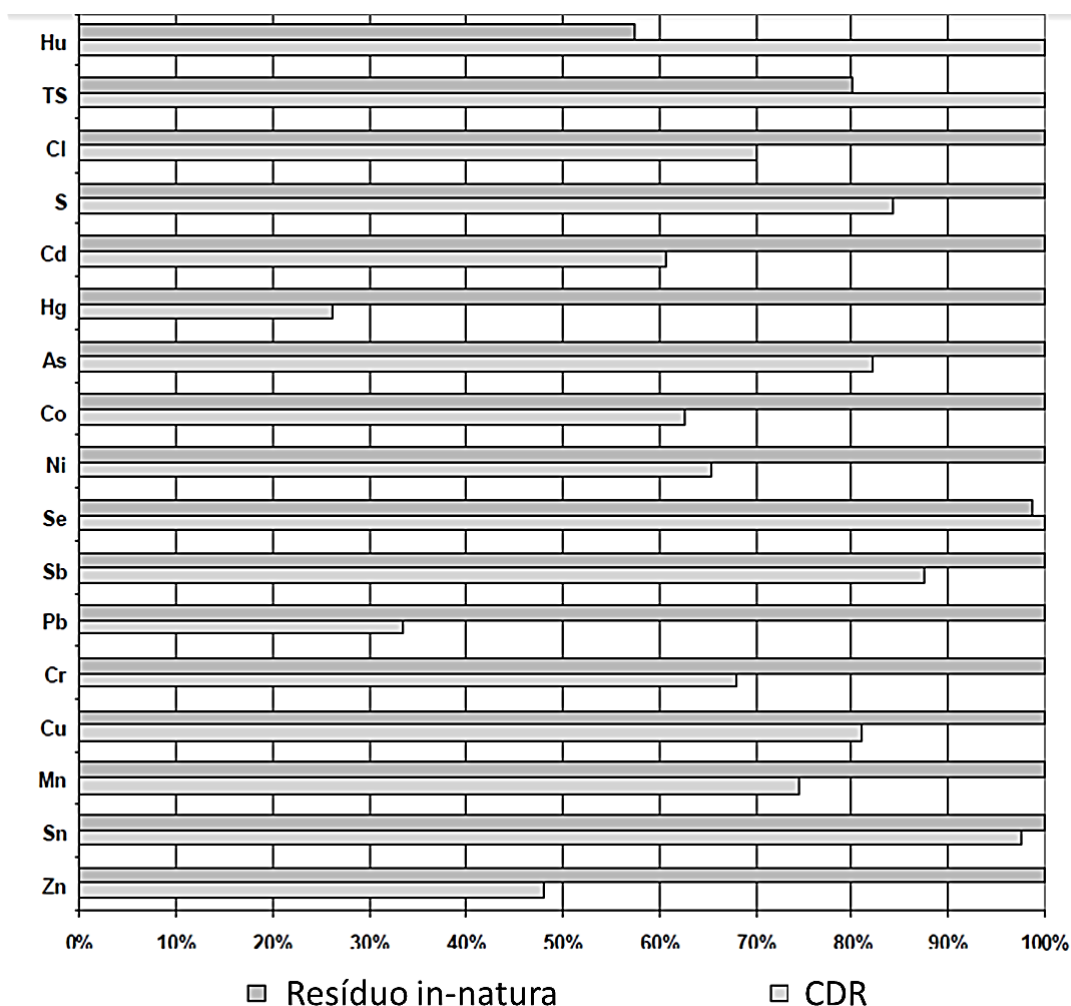


FIGURA10 - COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE ELEMENTOS TRAÇO EM CDR E RESÍDUO NÃO RECICLÁVEL.  
 FONTE: GALENKEMMPER, 2000

#### 2.2.3.5 Matérias-Primas de Substituição

Além do combustível outro grande consumo é o de matérias-primas. Alguns tipos de resíduos podem ser inseridos no processo como matérias-primas de substituição, o que contribui para o uso racional de recursos naturais como matérias-primas. Devem, porém, possuir características que sejam compatíveis na sua composição, tenham baixa abrasividade no processo de moagem e combinabilidade térmica.

Vários resíduos podem ser utilizados com facilidade nos fornos de cimento: lama de carbonato de cálcio da indústria de papel, bagaço de cana da indústria de açúcar, e de fertilizantes,  $\text{Ca(OH)}_2$  de usinas de acetileno, escórias de siderúrgicas e

de outras indústrias semelhantes, cinzas volantes, provenientes usinas termelétricas que usam carvão, lama vermelha e “GAMA”C<sub>2</sub>S da indústria de alumínio, etc. (CARVALHO, 1996).

Pelo grande número de tipos de resíduos, a legislação é bem específica para esta atividade limitando e regulando os processos de queima de resíduos no coprocessamento.

Na TABELA 4 podemos verificar exemplos de resíduos utilizados como matérias-primas de substituição. Na Alemanha do total de matérias-primas na produção de clínquer, mais de 20% são resíduos (VDZ, 2013).

TABELA 4- RESÍDUOS COMO MATÉRIA-PRIMA DE SUBSTITUIÇÃO NA ALEMANHA

Compostos	Tipo de resíduo
<b>Compostos de Cálcio (Ca)</b>	Cal de indústria Lama de cal Lama de carbonato Lodo industrial Lodo de tratamento de água potável
<b>Compostos de Silício (Si)</b>	Areia de fundição e de cromo Microsílica
<b>Compostos de Ferro (Fe)</b>	Abrandamento da sílica Lama vermelha de fabricação de Alumínio Escória de estanho Isca de laminação Pneus Minério pós-siderurgia
<b>Compostos de Alumínio, Sílica e Cálcio (Al-Si-Ca)</b>	Cinzas da queima de pedra de carvão e carvão fóssil Escória de fósforo Areia de branqueamento Cinza de ciclone Restos de processamento de pedra natural Restos da indústria de papel Cinzas volante Solos contaminados
<b>Compostos de enxofre (S)</b>	Gesso de dessulfurização de gases Gesso químico
<b>Compostos de Flúor (F)</b>	Fluoreto de Cálcio de lodo de filtro
<b>Compostos de Alumínio (Al)</b>	Escória de produção de sal

FONTE: LIEBL E GERGER(1993) e VDZ (2011)

#### 2.2.3.6 Tipos de Alimentação no Forno

Basicamente existem três maneiras do resíduo entrar no processo de clinquerização, dependendo da característica do resíduo: junto com a matéria prima, no pré calcinador ou pelo maçarico. Resíduos também podem ser misturados diretamente na produção de cimento quando entra como aditivo junto ao clínquer.

Andrade e Erbe (1996) listam e detalham as possibilidades de alimentação em fornos, dependendo da composição do resíduo e das características do forno:

##### **Alimentação de materiais via matéria-prima**

O resíduo é misturado à farinha crua ou ao material bruto antes da moagem. Para esta prática é importante que o resíduo seja inerte, e o poder calorífico também não pode ser muito alto para que não exista a possibilidade de queimar antes de chegar aos fornos nos processos de moagem e secagem. Outra característica importante é que o resíduo não pode possuir compostos que volatilizem nestes processos. Neste ponto entram a maior parte dos resíduos utilizados como matéria-prima de substituição.

##### **Alimentação via carvão**

Boa parte dos fornos é alimentado com carvão e alguns resíduos podem ser alimentados em conjunto com o carvão, como é o caso do lodo de estação de tratamento desidratado. Aqui o resíduo não pode possuir inflamabilidade por causa do risco de explosões, nem possuir compostos voláteis a temperatura de secagem próxima a 300°C. Algumas fábricas usam o ar de saída dos ciclones ou de resfriamento do clínquer para este processo e podem carregar estas emissões.

A facilidade desta alimentação é a praticidade na adequação operacional, pois se utiliza do sistema de alimentação conhecido.

##### **Alimentação de materiais via pré-calcinador**

Embora a temperatura neste ponto não seja tão alta como a no maçarico, atinge níveis suficientes para permitir a entrada de resíduos, porém com restrições. A temperatura neste ponto é 830 a 950°C. Neste ponto geralmente são inseridos os pneus.



### **Alimentação via maçarico**

Este ponto é o mais recomendado para alimentação de resíduos pelas altas temperaturas e tempo de residência. A temperatura pode chegar a 2000°C na chama e 1450°C no clínquer. Neste ponto são geralmente inseridos os resíduos líquidos, CDR's e pós. A desvantagem neste ponto é a necessidade de adequação no processo de alimentação, o maçarico deve possuir dutos para os resíduos utilizados.

#### **2.2.4 Impactos Ambientais**

O setor do cimento é altamente impactante, cada fase da produção gera diferentes interferências no meio ambiente. Em geral as emissões atmosféricas, a exploração de matéria-prima, o ruído, as vibrações e o consumo de energia, seja na forma de combustível ou elétrica, são as mais conhecidas.

Milanez (2009) apresenta vários exemplos de acidentes ambientais em países desenvolvidos e estudos de impacto ambiental, saúde ocupacional e ambiental além de estudos de incineração de produtos perigosos em fornos de cimento. Acidentes que comprovam o risco de grandes impactos que esta tecnologia poder gerar. Mesmo em países onde existe a alta formação técnica, sistema de controle ambiental e legislação ambiental rigorosa, o coprocessamento tem impactado a saúde das pessoas e a qualidade ambiental.

Materiais perigosos de diferentes origens estão presentes nas atividades de destinação de resíduos, tornando se um grande potencial de impacto ambiental. O armazenamento no gerador, o transporte, a preparação e a destinação final estão cercados de riscos como vazamentos, incêndios, derramamento, acidentes rodoviários, etc.

Os riscos no gerador e no transporte são similares para todas as tecnologias de destinação, porem varia entre os processos de destinação final.

Como o foco deste trabalho é o processo de destruição e aproveitamento energético de resíduos, serão evidenciados os principais riscos para esta tecnologia. Estão principalmente no armazenamento, transporte interno, alimentação e nas emissões atmosféricas no processo de queima. O processo de clínquerização é responsável por 90% das emissões em média (VOTORANTIM, 2013).

Cuidados como identificação, armazenamento por compatibilidade química, controle de temperatura, umidade, manutenção dos equipamentos e dos locais de armazenamento são fundamentais para evitar acidentes no armazenamento e alimentação.

A preparação dos materiais para a queima, a *blendagem*, é onde se concentra um grande risco. Os materiais são triturados e misturados podendo expor o meio a impactos ambientais ainda maiores que dos resíduos separadamente. A existência de processos organizados e tecnicamente orientados é de extrema importância neste ponto.

A automação dos processos, como na Alemanha e Europa, minimiza os riscos, porém no Brasil muitas vezes os processos são manualmente conduzidos (MILANEZ, 2009).

O transporte também pode apresentar um grande risco, dependendo das condições dos meios de transporte (caminhões, estradas, trens, etc.), acessos às fábricas ou blendeiras e processos de carga e descarga. Neste item o Brasil apresenta um maior risco pelas condições das estradas e pela maior média de distâncias de um país continental.

Um dos temas centrais de impactos ambientais na destruição térmica e ganho energético de resíduos é a emissão atmosférica. A variedade e complexidade de contaminantes podem ser significativo nos resíduos, o que possibilita a formação de componentes extremamente perigosos durante a queima. O controle da temperatura e dos processos de tratamento das emissões deve ser rigoroso.

O processo de fabricação de cimento não é estanque pela presença de partes móveis no processo. Para evitar fugas de material o sistema trabalha em pressão negativa. Ventiladores antes da chaminé movimentam o ar para gerar o fluxo de ar no sistema (RCM, 2000).

O fluxo de ar no forno é importante no processo e por isso controlado de forma intensa. O volume de ar comburente deve ser ideal para que as condições estequiométricas sejam atendidas, usa-se um excesso mínimo para garantir o ar necessário para queima e para que energia não seja desperdiçada. (RCM, 92/2000)

As substâncias mais presentes e com maior potencial de impacto ambiental nas emissões atmosféricas são: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl, HF, dioxinas, material particulado e metais pesados (FISCHER, 2012). Estes e outros contaminantes traços são monitorados para atender às legislações.

No processo o ar segue do forno para os ciclones onde é utilizado para aquecer a matéria-prima que funciona como um filtro para gases. A matéria-prima possui grande área específica e alta alcalinidade se tornando um ótimo material para reter gases ácidos, dióxidos de enxofre, ácidos clorídrico e fluorídrico e outros poluentes como os metais pesados (KARSTENSEN, 2006).

Os principais poluentes das emissões atmosféricas serão detalhados a seguir.

#### 2.2.4.1 Dióxido de Carbono – CO<sub>2</sub>

A indústria de cimento gera muito dióxido de carbono, pois possui vários pontos de geração.

Consumo de energia para usos gerais, movimentação de equipamentos e máquinas: este impacto é gerado na maioria dos processos industriais e pode ser minimizado pela compra de energia de geração limpa.

Na queima de combustíveis e resíduos, a emissão pode ser neutra dependendo do combustível utilizado. Mas possui grande impacto, pois está completamente ligado ao processo produtivo e é fator chave na produção de cimento. Toda clínquerização depende de utilização de combustíveis para manter a alta temperatura no forno.

No processo de clínquerização o CaCO<sub>3</sub> é transformado em CaO + CO<sub>2</sub>. Em média para cada tonelada de clínquer produzida na União Européia são consumidas 1,52 toneladas de material cru. A maior perda de massa é dada pela emissão de CO<sub>2</sub>. (UBA, 2010) Esta fonte é responsável cerca de 60% das emissões totais de CO<sub>2</sub> de todo processo (VDZ, 2011).

A TABELA 5 exemplifica a proporcionalidade das emissões nas indústrias de cimento da Alemanha:

TABELA5 - EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> POR ORIGEM DE GERAÇÃO

Emissões específicas de CO <sub>2</sub>					
ANO	Energia térmica (1)	Energia Elétrica	Farinha Crua	Soma	Unidade
2008	0,117	0,066	0,388	0,571	t CO <sub>2</sub> / t Cimento
2009	0,110	0,068	0,398	0,575	t CO <sub>2</sub> / t Cimento
2010	0,104	0,074	0,398	0,575	t CO <sub>2</sub> / t Cimento

(1) Apenas para combustíveis regulares.  
FONTE: VDZ (2011)

Em 1995, em razão das mudanças climáticas, as fábricas alemãs foram obrigadas a reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> na produção de energia térmica em 20% como data de comparação os anos 1987 até 2005. Esta meta foi aumentada e a partir de novembro de 2000 foi determinada a redução de 28% contando como data inicial 1990 e final 2012 (VDZ, 2011).

As emissões de CO<sub>2</sub> não são consideradas nos combustíveis de substituição, por isso existe a crescente busca por alternativas de resíduos com menor pegada de carbono que auxilia no processo de redução de emissões.

No Brasil, a participação do setor cimenteiro nas emissões totais de CO<sub>2</sub> das indústrias, levando em conta o processo industrial e a energia, foi de 1,4% em 2005 (CNI e ABCP, 2012).

No mundo, a parcela correspondente é de aproximadamente 5%, segundo a Iniciativa para sustentabilidade do cimento (CSI). A indústria do cimento brasileira no contexto internacional é referência nas emissões. No estudo realizado pela CSI, o Brasil foi identificado como o de menor emissão específica de CO<sub>2</sub> considerando mais de 900 unidades fabris, de 46 grupos industriais atuantes no mundo todo (CNI e ABCP, 2012).

De 1981 até 2006 houve uma redução de 30% na emissão de CO<sub>2</sub> nos processos de fabricação de cimento, principalmente pela alteração dos processos com fornos mais eficientes. O maior potencial já foi reduzido. A partir de agora a redução é focada no aumento de utilização de combustíveis alternativos e na produção de cimentos onde o clínquer pode ser substituído por outros materiais (KARSTENSEN, 2006).

#### 2.2.4.2 Água - H<sub>2</sub>O

Mesmo não sendo prejudicial, a água impacta no processo produtivo. Ela é gerada no processo de secagem da farinha crua. Pode ser gerada no processo de queima de lodos e resíduos úmidos. Quanto maior a umidade, mais energia é necessária para secar o material.

A geração de efluentes líquidos é apenas presente em processos que utilizam a água na moagem de matéria-prima, porém na sua maioria está presente o reaproveitamento da água.

#### 2.2.4.3 Monóxido de Carbono - CO

Todo processo de queima gera alguma quantidade de CO. A queima dos resíduos pode ser regulada, porém nunca será 100% completa. É um fator que é monitorado não somente pela questão ambiental, mas para controlar a eficiência do forno. E em casos de eletrofiltros o controle é realizado para que não haja risco de explosões, comuns neste tipo de filtro. Muitas fábricas estão substituindo os eletrofiltros por filtros de mangas para minimizar ou eliminar o risco de explosões.

#### 2.2.4.4 Óxidos de Enxofre - SO<sub>x</sub>

Enxofre é disponibilizado no processo pela matéria-prima e pelos combustíveis. Na farinha crua é encontrado na forma de sulfetos e sulfatos.

Os sulfatos nas matérias-primas são estáveis até as temperaturas de 1200°C quando são decompostos para SO<sub>2</sub>. Parte é então incorporada ao clínquer e parte segue para as regiões mais frias do forno onde reage com o óxido de cálcio, ou com o carbonato de cálcio, sendo reintroduzido ao forno (KARSTENSEN, 2006).

A razão de uma maior emissão de SO<sub>2</sub> é a oxidação dos sulfetos presentes na farinha crua quando passa pelos ciclones de pré-aquecimento a temperaturas de 370 até 420°C. (VDZ, 2011). Nestas temperaturas o óxido de cálcio (CaO) não está disponível para reagir com o SO<sub>2</sub>, portanto o que é gerado é praticamente emitido. Uma medida de redução na emissão de SO<sub>2</sub> é a introdução de CaO neste ponto do processo.

Quando o ar de saída é utilizado no processo de moagem de matérias-primas de 30 a 90% do SO<sub>2</sub> é absorvido pelas partículas da matéria-prima (KARSTENSEN, 2006).

Por depender grandemente da concentração da matéria-prima, na Alemanha, os limites de emissões podem variar conforme a variação da composição da rocha e do combustível utilizado.

#### 2.2.4.5 Óxidos de Nitrogênio - NO<sub>x</sub>

As altas temperaturas de 1450°C no forno e a 2000°C favorecem a formação de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) a partir do nitrogênio disponível do ar que é alimentado no forno.

Nas emissões do forno rotativo ele se encontra em 96% na forma de óxido nítrico (NO) e cerca de 5% de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>). Mas como o NO é convertido em NO<sub>2</sub> na atmosfera, normalmente as emissões são determinadas em NO<sub>2</sub> (VDZ, 2011).

Normalmente a maior parte gerada é do ar comburente em contato com altas temperaturas.

Para fornos com pré-calcinadores, onde até 60% do combustível é queimado e a temperatura não ultrapassa os 1200 °C, a contribuição de NO<sub>x</sub> dos combustíveis e das matérias-primas possui um maior impacto no volume total gerado (KARSTENSEN, 2006).

O uso do pré-calcinador com temperaturas máximas de 1.100°C favorecem a redução de emissão de NO<sub>x</sub>, assim como um controle de temperatura do forno. Porém, por garantia e para controlar possíveis variações, dois processos podem ser incluídos nos sistema de saída dos gases do forno. O SCR – *Selectiv Catalytic Reduction*, sistema de redução dos NO<sub>x</sub> para N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O na presença de NH<sub>3</sub> e um catalisador fixo em blocos de cerâmica. O outro processo é o SNCR - *Selectiv Catalytic Reduction* sistema de redução dos NO<sub>x</sub> para N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O na presença de NH<sub>3</sub> sem a presença do catalisador, sendo necessário um tempo maior para a reação, que pode afetar na emissão de NH<sub>3</sub>. Os dois processos reduzem significativamente os níveis de NO<sub>x</sub> (UBA, 2010).

#### 2.2.4.6 Ácido Clorídrico - HCl e Ácido Fluorídrico - HF

Na queima de compostos clorados podem ser formar cloretos ou ácido clorídrico, dependendo da quantidade de cal disponível para reagir com o cloro e formar o CaCl<sub>2</sub> (CARVALHO *et al.*, 1996).

Dependem da matéria-prima e/ou dos combustíveis, por isso o controle deste componente é importante. Caso as emissões sejam altas pode-se introduzir algum meio de absorção ou um lavador de gases (UBA, 2010).

Emissões de HCl ocorrem quando existe o cloro no combustível. O HCl é um gás tóxico, irritante, corrosivo e contribui para chuva ácida. Pode contribuir também para a formação de orgânicos clorados, como as dioxinas (ABELHA, 2005).

Conforme descrito no *by-pass*, o cloro recircula dentro do forno. O flúor é de 90-95% incorporado ao clínquer e o restante é fixo nas partículas em forma de fluoreto de cálcio  $\text{CaF}_2$  (UBA, 2010).

Devido ao ambiente alcalino no forno, o nível de HCl dificilmente é ultrapassado. O HF também é quase todo eliminado pela presença de cálcio em excesso (VDZ, 2011).

#### 2.2.4.7 Material Particulado

Existem várias fontes de material particulado no processo de fabricação do cimento, desde a extração, britagem, moagem, transporte de matérias-primas, passando por todo processo até o ensacamento do produto final.

Este sempre foi um dos maiores impactos das fábricas de cimento. Cinquenta anos atrás, apenas na saída do forno rotativo, eram emitidos cerca de 3.000 mg/m<sup>3</sup>. Atualmente não ultrapassa os 20 mg/m<sup>3</sup> na Alemanha e 70 mg/Nm<sup>3</sup> no Brasil (VDZ, 2011).

Este impacto é minimizado por filtros de mangas ou eletrofiltros, equipamentos necessários para atingir os limites da legislação. Neste ponto se concentra um grande custo do processo.

Filtros de mangas é um sistema de filtros de tecido que separa as poeiras dos gases de exaustão. As poeiras são retidas na superfície do tecido na passagem dos gases pelo sistema.

Os precipitadores eletrostáticos ou eletrofiltros usam forças eletrostáticas para separar o material particulado do gás de exaustão. As partículas são carregadas negativamente e então se aderem às paredes do filtro. As partículas, então, são descarregadas e caem para serem retiradas do sistema. Estes filtro possui uma grande eficiência, porém em picos de CO existe o risco de explosão.

Ambos os processos podem chegar à eficiência de despoeiramento de até 99,99%, podendo alcançar níveis de emissão menores que 20 mg/m<sup>3</sup>.

#### 2.2.4.8 Metais

Os metais são considerados muitas vezes como substâncias traço por aparecerem em concentrações muito baixas. Porém, devem ser monitorados pelo potencial de poluição.

Eles não são destruídos durante o processo, são na verdade distribuídos entre as emissões atmosféricas e a cinza incorporada ao produto. O mercúrio, que volatiliza entre 120 e 150°C e o tálio (300 - 350°C), e outros metais mais voláteis, são emitidos pelas chaminés. O cádmio e o chumbo, metais semivoláteis, recirculam no processo pela variação de temperatura. Volatilizam na região do maçarico onde as temperaturas são mais altas e condensam nas regiões de temperaturas menores, como nos ciclones. Parte destes metais acaba incorporando ao clínquer e também podem ser retirados pelo by-pass. A maioria dos metais, são incorporados ao clínquer e estarão no produto final, são não voláteis (SANTI, 2003).

As formas metálicas ou os cloretos são as mais voláteis, como zinco, arsênio, selênio, cádmio, antimônio e chumbo que possuem ponto de ebulição < 1000°C. (SIQUEIRA, 2005).

O cimento sempre possui concentrações de metais, mesmo que não seja produzido utilizando resíduos. As matérias-primas e os combustíveis tradicionais também possuem metais pesados, muitas vezes acima de alguns resíduos. (GENDEBIEN, 2003).

Após a cura do cimento os metais ficam inertizados, entretanto todos os envolvidos no processo de fabricação e utilização ficam expostos a estes contaminantes. Funcionários da indústria e trabalhadores da construção civil entram em contato e aspiram partículas de cimento (MILANEZ, 2009).

Estudos de Gendebien (2003) mostram que a utilização de resíduos, como combustíveis de substituição, tende a aumentar a concentração de metais no clínquer. Neste estudo foi realizado uma comparação com o uso de 50% de resíduos. Os resultados apresentados eram de 5 resíduos diferentes e todos resultaram no aumento na concentrações de metais no clínquer, porém na sua



maioria dentro dos limites legais apresentados. Maringolo (2001) descreveu resultados similares com o uso de 30% de resíduos .

No QUADRO 1 verifica-se a origem, processos de geração e impactos dos metais. Grande parte deles está presente no solo e também na queima de combustíveis evidenciando que o processo de fabricação de cimento sempre terá a emissão de metais na atmosfera e o clínquer sempre terá alguma concentração de metais.

QUADRO 1 - METAIS: ORIGEM, COMPORTAMENTO E IMPACTO

<b>Tálio (Tl)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Em pequenas concentrações no solo e reservas de tálio.
<b>Produtos ou processo</b>	Usado na manufatura de equipamentos eletrônicos, chaves, semicondutores, vidros especiais, procedimentos médicos, entre outros. Gerado na queima de carvão e fusão com traços de contaminante na matéria-prima.
<b>Meio de Dispersão</b>	Permanece no ar, água e solo por um longo tempo e não se deposita. Alguns compostos são removidos pela neve e chuva. Absorvido pelas plantas. Metabolizado por peixes e moluscos.
<b>Meio de contaminação</b>	Por alimentos contaminados, fumaça de cigarro, contato direto, ingestão de ar, água ou solos contaminados.
<b>Impacto</b>	Sistema nervoso, entumescimento de dedos das mãos e dos pés pela inalação de tálio. Pela ingestão, vômito, diarreia, perda de cabelo temporária, danos ao sistema nervoso, pulmões, coração, no fígado e rins podendo causar a morte. Não é cancerígeno.
<b>Cádmio (Cd)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Encontra-se associado a outros minérios, com zinco, mas também como sulfeto. Na natureza é bem distribuído sendo encontrado em altas concentrações em rochas sedimentares e fosfatos marinhos.
<b>Produtos ou processo</b>	Exploração de zinco, chumbo e cobre. Utilizado para recobrimento de aço e ferro, estabilizador de cloreto de vinila (estearato de cádmio), pigmentos para plásticos e vidros, baterias cádmio-níquel recarregáveis, ligas, fungicidas, pirotécnica, aditivo em indústria têxtil, em fios elétricos, entre outros.
<b>Meio de Dispersão</b>	Volatiliza em altas temperaturas e se agrega a partículas inaláveis. Tempo de residência na atmosfera de 1 a 10 dias. Possui boa mobilidade na água. É carregado por chuvas, erosão, vazamentos de aterros, entre outros.
<b>Meio de contaminação</b>	Pode ser inalado e absorvido pela pele, porém este processo é lento. Quando ingerido também pode ser absorvido em até 5%. Após absorção ele se distribui pelo corpo, principalmente no fígado e nos rins.
<b>Impacto</b>	Um dos 11 poluentes tóxicos persistentes e bioacumulativos na lista de metais tóxicos da EPA. Inalação de gases persistentes com cádmio pode causar pneumonia e edema pulmonar, além de destruir as células epiteliais. Pouco cancerígeno para humanos.
<b>Mercúrio (Hg)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Encontrado em regiões vulcânicas, veios ou fraturas minerais próximos a termas. São emitidos naturalmente por vulcões e evaporação de corpos hídricos.
<b>Produtos ou processo</b>	55% das emissões antropogênicas são de indústria cloro-álcali, equipamentos eletrônicos e tintas. Utilizado como cátodo na produção de cloro-soda, baterias, lâmpadas elétricas, interruptores, barômetros, manômetros, laboratórios, processos de mineração, indústria farmacêutica, entre outros. Queima de carvão, óleo e gás natural, produção de cimento, tratamento de minérios de enxofre, incineração de lixo e resíduos de metalurgia.
<b>Meio de Dispersão</b>	Na forma elementar e de vapor percorre grandes distâncias, em outras formas tendem a se depositar próximas a fonte. Na forma de vapor pode permanecer na atmosfera de 4 meses a 4 anos. Solúvel e quando passa para o meio aquático é absorvido e sedimenta.

Continua

## Continuação

<b>Meio de contaminação</b>	Ar, água e solo. Preferencialmente absorvidos pelos pulmões, na forma metálica e de compostos orgânicos, 80% dos vapores são absorvidos pelos alvéolos. Na forma de sais inorgânicos depende do tamanho da partícula e da solubilidade. A absorção metálica por via oral é desprezível (< 0,01%) sendo moderadamente absorvido por meio dérmico.
<b>Impacto</b>	Se deposita preferencialmente nos rins e no cérebro, ocasionando efeitos neurológicos. A inalação pode causar hemoptose, cianose, pneumonite e <i>stress</i> pulmonar além de comprometimento pulmonar permanente. Não cancerígeno.
<b>Arsênio (As)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Presente naturalmente no solo, ar e água. Em alimentos e em minérios de ouro, prata, cobalto, níquel, chumbo, cobre e antimônio, sendo subproduto do tratamento desses materiais.
<b>Produtos ou processo</b>	Preservação de madeira, herbicidas, ração animal, descolorante, clareador e dispersante na produção de garrafas de vidro, aditivo de ligas não ferrosas, ligas de chumbo em baterias, no latão para aumentar a resistência à corrosão e em semi-condutores. Também pode ser encontrado em alimentos contaminados.
<b>Meio de Dispersão</b>	Tempo de permanência de 9 dias na atmosfera. Alguns compostos arseniais são relativamente voláteis. Quando em contato com o solo é adsorvido facilmente. Microorganismos transformam o arsênio em composto volátil. Também é transportado pela água.
<b>Meio de contaminação</b>	A principal forma de exposição é pela ingestão de alimentos ou água, sendo mínima pela inalação. Após absorção no organismo é dividido para todos os tecidos e órgãos.
<b>Impacto</b>	Poucos estudos, porém é cancerígeno principalmente para pele e para órgãos internos.
<b>Cobalto (Co)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Encontrado em rochas, solo, águas, plantas e animais.
<b>Produtos ou processo</b>	Existem formas radioativas e não radioativas usadas na produção de ligas de metais, na manufatura de motores de avião, ímãs, ferramentas de trituração e cortar e junções de tubos. Compostos são usados para colorir vidro, cerâmicas e tintas. Usado para secagem de esmalte de porcelana e tintas. Os radioativos são usados na medicina. É emitido na queima de carvão e óleo ou na produção de ligas metálicas.
<b>Meio de Dispersão</b>	No ar se agrega às partículas que se depositam em poucos dias. Alguns compostos são solúveis em água. Não pode ser destruído no ambiente.
<b>Meio de contaminação</b>	Ar, água e alimentos. O alimento e a água são as maiores fontes de exposição.
<b>Impacto</b>	Positivo: É parte da vitamina B12. Negativo: A exposição a altos níveis pode resultar em efeitos no pulmão, coração e dermatite. Cancerígeno por contato direto no músculo ou na pele.
<b>Níquel (Ni)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Ocorre naturalmente na crosta terrestre. Na atmosfera ocorre na forma de aerossóis. Nas fontes naturais está na forma de óxido e na emissão de vulcões e queimadas na forma de poeiras. Aerossol marítimo pode ser a principal fonte de níquel atmosférico e o solo e os vulcões as principais fontes naturais.
<b>Produtos ou processo</b>	Gerado nas emissões de combustão de resíduos e óleos combustíveis. Também gerado na mineração e refino do níquel. Disposição de resíduos de atividades de fusão e refino do metal diretamente no solo. Presente no cigarro.
<b>Meio de Dispersão</b>	No ar depende do tamanho das partículas e condições atmosféricas. A bioacumulação em organismos aquáticos é insignificante. Plantas acumulam níquel no solo pelas raízes, dependendo do solo.
<b>Meio de contaminação</b>	Pela inalação, ingestão e contato direto. Os compostos solúveis são mais absorvidos. A retenção nos pulmões é de 75%.
<b>Impacto</b>	Em contato com a pele pode ocorrer dermatite. A inalação pode gerar, alergias, rinite, sinusite, câncer de cavidades nasais, pulmões, e outros órgãos, ainda pode estar ligada a nefrotoxicidade.

Continua

<b>Selênio (Se)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Não é encontrado distribuído uniformemente pelo ambiente. Fontes naturais estão nos vulcões, e na erosão de rochas e solos.
<b>Produtos ou processo</b>	Obtido como subproduto de refino de outros metais. Usado associado a semicondutores, na metalurgia, fabricação de vidros, pigmentos e cerâmica, borracha, fotografia, reprográfica, antioxidante em óleos lubrificantes e na indústria farmacêutica. Gerado na combustão de carvão, óleo combustível e produção de metais (cobre, chumbo e níquel).
<b>Meio de Dispersão</b>	Possui forma volátil ou agregado a material particulado. Acumula em plantas e animais.
<b>Meio de contaminação</b>	Inalação e ingestão. É bem absorvido e distribuído de forma homogênea pelos tecidos.
<b>Impacto</b>	Quando inalado por longo prazo pode causar quadros de toxicidade. Não cancerígeno
<b>Telúrio (Te)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Encontra-se em minérios de ouro, cobre e enxofre.
<b>Produtos ou processo</b>	Subproduto do refino de cobre. Utilizado na metalurgia, vulcanização da borracha, catalisador na fabricação de dispositivos termelétricos, para formação de ligas de chumbo e cobre em solda, agente colorante e pigmento em cerâmica, além de seus vapores serem utilizados em lâmpadas. Gerado pela combustão de carvão e plantas de cobre eletrolítico.
<b>Meio de Dispersão</b>	Presente no ar e no solo. O telúrio não é solúvel em água. Pode ser encontrado em alimentos, que acumulam telúrio proveniente do solo.
<b>Meio de contaminação</b>	Pela inalação e ingestão.
<b>Impacto</b>	Alguns de seus compostos podem causar náusea e depressão do sistema nervoso central. A exposição aguda por via respiratória pode causar dor de cabeça, fadiga, sonolência e irritação na pele, olhos, garganta e nariz, além de afetar o fígado e rins.
<b>Antimônio (Sb)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Encontrado na crosta terrestre é extraído misturado com outros metais para formar ligas e combinado com oxigênio para formar óxidos.
<b>Produtos ou processo</b>	Pode ser utilizado em baterias, soldas, folhas e tubulações de metal, rolamentos, carcaças e latão. O óxido pode ser utilizado como aditivo em tecidos e plásticos com efeito anti-chama. Também é encontrado em tintas, cerâmicas, esmaltes para plásticos, metal e vidro.
<b>Meio de Dispersão</b>	Agrega-se a partículas finas. Maior parte encontra-se no solo.
<b>Meio de contaminação</b>	Inalação, ingestão de água ou alimentos contaminados.
<b>Impacto</b>	Exposição a altos níveis e por um período prolongado pode gerar irritação nos olhos e nos pulmões, dor de estômago, diarreia, vômito, e úlceras estomacais. O antimônio não é cancerígeno, apenas o trióxido de Antimônio
<b>Vanádio (V)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Encontrado na forma metálica e de cristais. Pode ser encontrado em rochas, minério de ferro e depósitos de petróleo. Vanádio puro não funde, mas combina com outros elementos.
<b>Produtos ou processo</b>	Óxido de vanádio é usado em aços especiais, partes de automóveis, molas e mancais. Liga de vanádio com ferro é usada em partes de aviões. Pequenas quantidades de vanádio são usadas na manufatura de borracha, plástico, cerâmica e outros produtos. Emitido na queima de óleos combustíveis.
<b>Meio de Dispersão</b>	Permanece no ar, na água e no solo por longo tempo, não sendo muito solúvel em água. Pode combinar com elementos e partículas e se fixa em sedimentos. Baixos níveis em plantas.

Continuação

<b>Meio de contaminação</b>	Ar, água e solo. A exposição pode ocorrer a baixos níveis no ar, água e alimento. Em altas concentrações pela ingestão de alimentos e inalação de ar próxima a indústrias que queimam carvão ou óleo combustível, que emitem óxidos de vanádio para atmosfera ou ingerindo água contaminada próxima a locais ou aterros contendo vanádio.
<b>Impacto</b>	O vanádio não é rapidamente absorvido pelo corpo pelo sistema digestivo ou na pele. A exposição a altos níveis pode causar danos à saúde principalmente ao respirar altos níveis atacando os pulmões, traquéias e olhos.
<b>Estanho (Sn)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Encontrado naturalmente na crosta terrestre.
<b>Produtos ou processo</b>	Utilizado na fabricação de latas e está presente no latão, bronze e alguns materiais de solda. Compostos inorgânicos formados com cloro, oxigênio e enxofre são usados em pastas de dentes, perfumes, sabões, agentes clorantes e tinturas. Os compostos orgânicos são utilizados para manufatura de plásticos, embalagens de alimentos, tubos plásticos, pesticidas, tintas e repelentes. Gerado na mineração, combustão do carvão e do óleo e produção de materiais contendo estanho.
<b>Meio de Dispersão</b>	Metal não solúvel em água, porém pode ser encontrado no ar, água e solo, na forma de compostos orgânicos e inorgânicos em locais próximos a rochas ou onde é explorado, manufaturado ou usado. Na atmosfera, o estanho se adere a partículas. Os compostos solúveis aderem ao solo e sedimentos.
<b>Meio de contaminação</b>	Pode ser ingerido por alimentos contaminados ou bebidas de vasilhames que contenham estanho. Pode ser inalado próximo a fontes de emissão.
<b>Impacto</b>	Os compostos inorgânicos deixam o corpo rapidamente, porém podem causar dores de estômago, anemia e problema no fígado e rins. Os compostos orgânicos podem causar irritação nos olhos, e interferir nas atividades cerebrais e sistema nervoso, causando a morte em casos graves. Ambos compostos irritam a pele e os olhos. Não é cancerígeno.
<b>Cromo (Cr)</b>	
<b>Origem Natural</b>	O cromo não é encontrado livre na natureza. Liberado por incêndios florestais, erupções vulcânicas.
<b>Produtos ou processo</b>	Processos industriais de combustão! Pode estar na forma elementar, trivalente ou hexavalente. Pode ser oxidado na combustão para forma hexavalente.
<b>Meio de Dispersão</b>	Nas condições normais na forma trivalente e elementar o cromo é não-reativo. Na forma hexavalente pode reagir na atmosfera com particulado ou reagir para a forma trivalente. Na atmosfera assume a forma estável. Quando depositado no solo entra em contato com o solo e pode reduzir-se a trivalente. Aproximadamente 40% do cromo está disponível na forma hexavalente. O tempo de residência na atmosfera é de 10 dias.
<b>Meio de contaminação</b>	A absorção da forma hexavalente é maior que a trivalente, por ser mais solúvel. A principal via de contaminação é a respiratória por vapores, névoas, fumos e poeiras. Por via oral também pode ser absorvida e por meio dérmico ambas as formas podem penetrar. É retido nos pulmões devido à inalação de partículas.
<b>Impacto</b>	A dermatite causada pelo contato de trabalhadores com o cimento pelo caráter alcalino do cimento pode ser intensificada na presença de cromo IV e cromo VI por sua ação irritante. (Milanez, 2009) A forma hexavalente é mais tóxica que a trivalente. A forma hexavalente é cancerígena. O trivalente e metálico não.
<b>Chumbo (Pb)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Abundante na natureza. As rochas ígneas e metamórficas que contêm o metal. É emitido por vulcões, intemperismo e névoas aquáticas.
<b>Produtos ou processo</b>	Lâminas, canos nas indústrias químicas, usado em soldas, material de revestimento automotivo, proteção de radiação ionizante, produção de baterias, revestimento de cabos, aditivo da gasolina, ligas metálicas. Sais de chumbo são utilizados como base de tintas e pigmentos. Indústrias de ferro e aço e processamento de chumbo são as fontes mais importantes.

Continua

## Conclusão

<b>Meio de Dispersão</b>	Encontrado nas águas superficiais e subterrâneas, também presente nos oceanos em baixos níveis. É incorporado pelas plantas. Na água se divide entre a fase aquosa e os sedimentos. No solo se acumula pela deposição da atmosfera e então é transportado para o meio aquático. Liga-se fortemente à matéria orgânica.
<b>Meio de contaminação</b>	Inalação, ingestão de água e contato com solos e alimentos contaminados. A taxa de absorção pela derme é reduzida, menor que por inalação e ingestão.
<b>Impacto</b>	No ar fica em forma de material particulado e pode se depositar no trato respiratório podendo passar para o sistema circulatório. Na exposição ocupacional 20-40% do chumbo permanecem no organismo e a maior parte é removida pelo próprio organismo. O sistema nervoso central é muito sensível ao chumbo. A absorção pela pele é pequena, menor do que pela inalação ou ingestão. Apenas o chumbo na forma orgânica não é cancerígeno.
<b>Cobre (Cu)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Encontrado na natureza na forma elementar, como sulfetos, arsenietos, cloretos e carbonatos, sendo abundante na forma de minérios. Fontes naturais são vulcões, incêndios de florestas, névoas aquáticas e processos biogênicos.
<b>Produtos ou processo</b>	Mineração, fundição, queima de carvão, tintas, fertilizantes, algicidas, suplemento alimentar e excrementos de animais e esgoto. A mineração e a fundição são os mais importantes. É aplicado em fios, ligas, condutores, galvanoplastia, tubulações, moedas, inseticidas, fungicidas, desinfetantes, pigmentos e outros. Gerado na combustão na forma de óxidos
<b>Meio de Dispersão</b>	A atmosfera é a principal forma de transporte. É absorvido por partículas na forma de óxidos sulfatos ou carbonatos. Deposita-se no solo com o passar do tempo ou pelas chuvas. É liberado para o curso d'água na forma de partículas e pode ser adsorvido na matéria orgânica, ferro hidratado, óxidos de manganês e se deposita. O cloreto de cobre tem ponto de ebulição de 1490°C e na forma metálica 2567°C. Permanecem no solo por longos períodos.
<b>Meio de contaminação</b>	Ar, solo e água contaminados. A via oral é a principal entrada no organismo. Também absorvido por via respiratória e dérmica, mas em menor escala.
<b>Impacto</b>	Por inalação pode gerar irritação respiratória, problemas gastrointestinais, hematológicos, hepáticos, endócrinos e oculares. Por ingestão, altas doses de sulfato de cobre podem causar a morte.
<b>Manganês(Mn)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Encontrado abundantemente em rochas e água. Na atmosfera é encontrado na forma de partículas. Sempre encontrado combinando com outras substâncias na forma de óxidos, sulfetos, carbonatos e silicatos.
<b>Produtos ou processo</b>	Pode ser emitido na produção de pilha seca e ferro-manganês e minerações. Processos de combustão e fusão geram o metal na forma de óxido.
<b>Meio de Dispersão</b>	As partículas no ar são depositadas pela gravidade ou chuvas.
<b>Meio de contaminação</b>	As partículas são normalmente muito pequenas (<5µm) que entram no organismo por inalação.
<b>Impacto</b>	Quando absorvido se fixa no fígado, pâncreas rins e intestinos. Altas concentrações podem causar inflamação nos pulmões (pneumonia química). A exposição crônica favorece o aparecimento de tosse e bronquite.
<b>Berílio (Be)</b>	
<b>Origem Natural</b>	Encontrado em rochas minerais, no carvão, solo e poeira de vulcões.
<b>Produtos ou processo</b>	Utilizado em dispositivos eletrônicos, partes de máquinas, aviões, cerâmicas, entre outros. Também presente no carvão, óleo e solo.
<b>Meio de Dispersão</b>	Alguns compostos são solúveis em água, mas a maioria se deposita no solo ou no fundo de corpos hídricos. No oceano porém isto pode levar centenas de anos.
<b>Meio de contaminação</b>	Inalação, ou ingestão de água ou alimento contaminado.
<b>Impacto</b>	Quando inalado em altas quantidades pode causar dano aos pulmões e pneumonia. Pessoas sensíveis ao Berílio podem desenvolver alergias que causam inflamações a baixos níveis de concentração. O berílio é cancerígeno.

FONTE: SIQUEIRA (2005)



A grande parte dos metais apresenta impactos relevantes apenas em altas concentrações. Como não existem pesquisas em humanos, apenas alguns casos históricos de contaminações, os limites para emissões se tornam difíceis de estabelecer. Por isso metais devem ser monitorados e evitados quando possível.

#### 2.2.4.9 Dioxinas e Furanos

Dioxinas é o nome utilizado para um grupo de 210 compostos orgânicos quimicamente relacionados. São também chamados de Dibenzo-p-dioxinas policloradas (PCDD) e dibenzo-p-furanos policlorados. Dezessete congêneres são de particular preocupação pelo arranjo dos átomos de cloro que os torna mais tóxicos. O componente mais tóxico é a 2,3,7,8 tetracloro-dibenzo-p-dioxina (TCDD) conforme TABELA 6 (KARSTENSEN, 2006).

São considerados como compostos químicos mais tóxicos produzidos pelo homem. São formados em reações químicas de clorofenóis, herbicidas e tem sido detectadas nos processos de combustão e incineração de resíduos. Processos industriais de branqueamento de papel com cloro livre também geram (RCM, 2000).

As dioxinas possuem uma alta resistência ao oxigênio e são estáveis até 800°C. São apolares, pouco solúveis em água, lipofílicas e quimicamente estáveis (KARSTENSEN, 2006). Além disso são lipossolúveis possuindo o tempo de meia vida na gordura de animais de até 10 anos. No solo o tempo de meia vida é de 2 a 9 anos, na atmosfera de até 32 dias e em águas superficiais de até 600 dias.

Todos os tipos de dioxinas são tóxicas e possuem alta tendência a bioacumulação. Os principais sintomas de intoxicação são:

- acne de cloro
- distúrbios digestivos
- distúrbios de funções nervosas e enzimáticas
- dores musculares e nas articulações
- danificação do fígado

A toxicidade depende do posicionamento e do número de átomos de cloro em sua composição. As pesquisas foram feitas em animais e transferidas para o ser humano. A TABELA 6 lista os tipos mais tóxicos.

TABELA 6 - FATORES DE EQUIVALÊNCIA DE TOXICIDADE (FTEQ) OU FATORES TÓXICOS

<b>Dioxinas</b>	<b>FTEQ<sub>(1)</sub></b>
Mono-, di-, e tri-CDDs (mono-, di- e tri-cloro-dibenzo-p-dioxinas)	0
2,3,7,8 - TCDD (tetracloro-dibenzo-p-dioxina)	1
outros TCDDs (tetracloros-dibenzo-p-dioxinas)	0
1,2,3,7,8 - PeCDD (pentacloro-dibenzo-p-dioxina)	0,5
outros PeCDDs (pentacloros-dibenzo-p-dioxinas)	0
1,2,3,4,7,8 - HxCDD (hexacloro-dibenzo-p-dioxina)	0,1
1,2,3,6,7,8 - HxCDD (hexacloro-dibenzo-p-dioxina)	0,1
1,2,3,7,8,9 - HxCDD (hexacloro-dibenzo-p-dioxina)	0,1
outros HxCDDs (hexacloros-dibenzo-p-dioxinas)	0
1,2,3,4,6,7,8 - HpCDD (heptacloro-dibenzo-p-dioxina)	0,01
outros HpCDDs (heptacloros-dibenzo-p-dioxinas)	0
OCDD (octacloro-dibenzo-p-dioxina)	0,001
<b>Furanos</b>	<b>FTEQ</b>
Mono-, di-, tri-CDFs (mono-, di- e tri-cloros-dibenzofuranos)	0
2,3,7,8 - TCDF (tetracloro-dibenzofurano)	0,1
outros TCDFs (tetracloros-dibenzofuranos)	0
1,2,3,7,8 - PeCDF (pentacloro-dibenzofurano)	0,05
2,3,4,7,8 - PeCDF (pentacloro-dibenzofurano)	0,5
outros PeCDDs (pentacloros-dibenzofuranos)	0
1,2,3,4,7,8 - HxCDF (hexacloro-dibenzofurano)	0,1
1,2,3,6,7,8 - HxCDF (hexacloro-dibenzofurano)	0,1
1,2,3,7,8,9 - HxCDF (hexacloro-dibenzofurano)	0,1
2,3,4,6,7,8 - HxCDF (hexacloro-dibenzofurano)	0,1
outros HxCDFs (hexacloros-dibenzofuranos)	0
1,2,3,4,6,7,8 - HpCDF (heptacloro-dibenzofurano)	0,01
1,2,3,4,7,8,9 - HpCDF (heptacloro-dibenzofurano)	0,01
outros HpCDFs (heptacloros-dibenzofuranos)	0
OCDF (octacloro-dibenzofurano)	0,001

(1) - Expressa a toxicidade dos congêneres em relação à da 2, 3, 7, 8-tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD); FTEQ = 1

Fonte: CONAMA (2002)

Uma das características da dioxina é que ela é quebrada em altas temperaturas, mas pode novamente se formar no processo de resfriamento. Portanto mesmo em fornos com altas temperaturas este problema não é solucionado. Neste processo o cloro liberado volta a se ligar com compostos orgânicos resultantes da queima incompleta. Para evitar a nova formação de dioxinas o resfriamento dos gases deve ocorrer de forma rápida para temperaturas

inferiores a 200°C. Fornos modernos com pré-aquecedores e pré-calcinadores possuem esta característica (KARSTENSEN, 2006).

Kartensen(2006) mostra estudo do PNUMA que atribui fatores de emissão a várias categorias de fontes e processos. Os fatores de emissão de dioxinas e furanos no coprocessamento de resíduos perigosos ficaram entre os mais baixos entre todas as categorias. Também apresenta o resultado de dois inventários de emissões que mostram as fábricas de cimento como responsáveis por menos de 1% das emissões de dioxinas para atmosfera.

As emissões de dioxinas e furanos são frequentemente discutidos na adição de resíduos como combustíveis de substituição. Porém todos os centros de pesquisa da indústria de cimento e outras instituições têm mostrado que as emissões são baixas e independentes do tipo de combustível utilizado (VDZ, 1996).

#### 2.2.4.10 Matérias Orgânicas

Matérias orgânicas estão presentes nos combustíveis e nas matérias-primas, podendo chegar a 0,8% da composição dependendo da rocha explorada.

A matéria orgânica dos combustíveis é totalmente destruída no processo de queima pelas altas temperaturas e tempo de residência.

Entre 400 e 600°C esta matéria orgânica da matéria-prima pode volatilizar . Testes realizados demonstram que 85 a 95% é convertida em CO<sub>2</sub>e 5 a 15% em CO na presença de 3% de oxigênio excedente do ar comburente. Uma pequena porção do COT, normalmente abaixo de 1%, é composto por compostos orgânicos voláteis (COV's).

Os índices de monóxido de carbono e hidrocarbonetos medidos nos gases de saída são originados da matéria-prima e por isso não podem ser considerados indicadores da qualidade para verificação da combustão completa ou incompleta (KARSTENSEN, 2006).



#### 2.2.4.11 Outros

O ruído e o odor raramente são impactos problemáticos, ocorrendo apenas em situações específicas. A proximidade das minas a concentrações de residências pode gerar incomodo pelas explosões e trabalhos mecânicos. O manuseio de resíduos ou problemas com compatibilidade na mistura de resíduos pode gerar odor.

Situações de emergência podem levar a gerações de odor, ruído e emissões atmosféricas não previstas

### 2.3 LEGISLAÇÃO E NORMAS REGULAMENTADORAS NO BRASIL E NA ALEMANHA

#### **BRASIL**

No Brasil existe o princípio da hierarquia da legislação, que dá mais força para algumas leis. A legislação decresce na seguinte ordem: constituição, emendas a constituição, leis complementares, leis ordinárias, decretos, leis estaduais, leis municipais, portarias, resoluções.

Também existe a hierarquia dos órgãos e entidades de meio ambiente instituídos pelo SISNAMA – Sistema Nacional de Meio Ambiente, Lei 6.938/81. São órgãos da União, Estados, Distrito Federal, Territórios e Municípios. Em ordem decrescente (PETERS, 2012):

- Conselho do Governo - Composto pelos ministros de estado e o advogado geral da união com a função de assessorar o presidente da república em assuntos relativos ao meio ambiente.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Órgão consultivo e deliberativo. Assessora, estuda e propõe ao Conselho do Governo, diretrizes, normas e padrões.
- Ministério de Meio Ambiente – Supervisiona e controla a implementação das diretrizes e políticas ambientais.
- IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis é o órgão executor. Órgão federal responsável, entre

outros, pelo controle, licenciamento, fiscalização ambiental em âmbito regional e nacional.

- Órgãos seccionais – Órgãos estaduais responsáveis pelo controle, licenciamento e fiscalização ambiental, podem elaborar normas mais restritivas.
- Órgãos locais – Órgãos municipais responsáveis pelo controle, licenciamento, fiscalização ambiental, podem elaborar normas mais restritivas.

O Direito Ambiental é novo no Brasil, porém vem seguindo as tendências internacionais. Muitas das leis são baseadas nos sistemas de países desenvolvidos. O que coloca o Brasil em um país com leis bastante rígidas.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos(PNRS), Lei:12.305, de 2 de agosto de 2010, aprovada pelo Congresso Nacional apresenta como o País quer lidar com a temática dos resíduos para os próximos anos definindo vários itens importantes: o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações que serão utilizados pelo governo federal.

Dos princípios descritos no artigo 6º, os que mais se aplicam para este trabalho são:

I – a prevenção e a precaução; aplicando para os resíduos, a melhor tecnologia deve ser adotada visando à prevenção e a precaução dos possíveis impactos causados pela destinação incorreta de resíduos.

II – o poluidor-pagador e o protetor-recebedor; o gerador é responsável pelo dano causado à natureza pela má destinação do resíduo.

IV – o desenvolvimento sustentável; A busca pela sustentabilidade deve ser fator importante na decisão de qual tecnologia adotar no momento da escolha de qual destinação utilizar.

V – a ecoeficiência, mediante a compatibilização entre o fornecimento, a preços competitivos, de bens e serviços qualificados que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida e a redução do impacto ambiental e do consumo de recursos naturais a um nível, no mínimo, equivalente à capacidade de sustentação estimada do planeta; A busca por tecnologias cada vez mais eficientes e financeiramente sustentáveis é importantíssimo no desenvolvimento de tecnologias de destinação de resíduos.

O Art. 7º descreve os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, dos quais alguns possuem relação com o tema abordado:

I – proteção da saúde pública e da qualidade ambiental; A tecnologia para destinação de resíduos deve, entre outros, buscar o maior ganho ambiental e a higienização dos resíduos, onde as tecnologias de valorização energética possuem grande eficiência.

II – não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos; A valorização energética de resíduos pode ser vista como a disposição final ambientalmente adequada ou como reciclagem de materiais, pois estão sendo reaproveitados.

IV – adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais; - Este trabalho busca trazer as tendências tecnológicas limpas na área de recuperação energética.

V – redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos; - Apontada como a melhor destinação para a maior parte dos resíduos perigosos a destruição térmica pode ocorrer em um ambiente de recuperação energética.

XIV – incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético; - Novamente a busca por tecnologias ambientalmente corretas é apontado como importante neste processo de definição de destinação de resíduos sólidos.

No Art. 8º são descritos os instrumentos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, entre outros os aplicáveis ao tema está o IX instrumento – os incentivos fiscais, financeiros e creditícios; - O incentivo financeiro por parte do governo é de extrema importância para a implementação de tecnologias de recuperação energética. As adaptações para o coprocessamento ou construções de estruturas para recuperação de energia são em sua maioria tecnologias de alto custo de instalação e operação.

O Art. 9º descreve a ordem de prioridade que deve ser seguida na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. - Modelo igual ao da união européia apresentado na introdução deste

trabalho e que sugere prioritariamente tecnologias de recuperação energética antes de tecnologias de disposição final.

Também descreve e recomenda a recuperação energética no seu parágrafo primeiro: § 1º Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

O Art. 30. institui a chamada responsabilidade compartilhada, que responsabiliza fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, os consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, pelo ciclo de vida dos produtos. E em seu parágrafo único, define que os objetivos, entre outros, é de promover o aproveitamento de resíduos sólidos, direcionando-os para a sua cadeia produtiva ou para outras cadeias produtivas. E reduzir a geração de resíduos sólidos, o desperdício de materiais, a poluição e os danos ambientais;

Além disso, define que as pessoas jurídicas referidas no art. 38 são obrigadas a elaborar plano de gerenciamento de resíduos perigosos onde, entre outros, deverá estar descrito o atendimento ao conteúdo mínimo estabelecido no art. 21 e se soma no inciso III – adotar medidas destinadas a reduzir o volume e a periculosidade dos resíduos sob sua responsabilidade, bem como a aperfeiçoar seu gerenciamento;

O Art. 42.O poder público poderá instituir medidas indutoras e linhas de financiamento para atender, prioritariamente, às iniciativas de:

VII – desenvolvimento de pesquisas voltadas para tecnologias limpas aplicáveis aos resíduos sólidos;

VIII – desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos.

O Art. 44. possibilita a instituição de mecanismos de incentivos fiscais, financeiros ou creditícios para, segundo o inciso I – indústrias e entidades dedicadas à reutilização, ao tratamento e à reciclagem de resíduos sólidos produzidos no território nacional; respeitadas as limitações da Lei Complementar nº 101, de 4 de maio de 2000 (Lei de Responsabilidade Fiscal).

Verifica-se por meio de vários artigos que existe a necessidade de avançar tecnologicamente na questão da destinação de resíduos focando na sustentabilidade ambiental e econômica.

Seguindo os princípios e objetivos da PNRS existem leis federais, estaduais e municipais. Busca-se aqui trazer o que se aplica para o coprocessamento.

Resolução CONAMA 237/97 - Determina as atividades que devem passar pelo processo de licenciamento ambiental e estão listadas no anexo 1 desta legislação, onde consta também a fabricação de cimento.

Após esta data surgiram outras resoluções e legislações estaduais conforme QUADRO 2, que serão descritas neste capítulos.

QUADRO 2 - HISTÓRICO LEGISLAÇÃO COPROCESSAMENTO NO BRASIL

1998	1999	2002	2003	2006	2009	2010
FEAM/MG Deliberação Normativa DN 26	CONAMA 264 Coprocessa mento	CONAMA 316 Sistema de tratamento térmico de Resíduos	CETESB Norma Técnica P4. 263	SEMA/ PR Resolução 54	CEMA/PR Resolução 76	FEAM/MG Deliberação normativa DN 154
CETESB Procedimen to Coprocessa mento	FEBAM/RS Norma técnica 01/99					

FONTE: Adaptado de ABCP (2013)

Resolução CONAMA nº 264/99 - dispõe sobre o licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividade de coprocessamento de resíduos. Surgiu na necessidade de definir procedimentos, critérios e aspectos técnicos de licenciamento para coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de clínquer.

O artigo 1º define quais resíduos não podem ser coprocessados:

- Domiciliares brutos
- Resíduos de serviço de saúde
- Radioativos
- Explosivos
- Organoclorados
- Agrotóxicos e afins.

O artigo 4º define que somente serão permitidos estoques de resíduos que justifiquem o seu uso no coprocessamento.

O artigo 5º define que o coprocessamento deve ocorrer de maneira a que garanta a manutenção da qualidade ambiental, evitar danos e riscos a saúde e atender aos padrões de emissão nesta resolução.

No 2º capítulo estão descritos os procedimentos para o coprocessamento. Na seção I ficam definidos os critérios básicos para a utilização de resíduos que devem passar por um teste de queima e atender os parâmetros desta resolução para poder ser utilizado como matéria prima quando apresenta características similares aos materiais normalmente utilizados ou combustível quando o ganho energético for comprovado.

Na seção II define que as indústrias de cimento devem passar por processo de licenciamento para poder realizar o coprocessamento e baseia-se nos estudos descritos nas seções III, IV, V, VI desta resolução, são eles:

I - Estudo de Viabilidade de Queima - EVQ; - Informações sobre as características dos resíduos que serão coprocessados e os dados técnico-operacionais da fábrica com o foco nos pontos de utilização dos resíduos.

II - Plano de Teste em Branco; - Planejamento de como será realizado o teste em branco. Teste que é realizado em condições normais de funcionamento sem a alimentação de resíduos para verificar as emissões e a compatibilidade com a queima.

III - Relatório de Teste Branco; - Após a aprovação do plano é realizado o teste elaborado o relatório.

IV - Plano de Teste de Queima - PTQ; - Planejamento de como será realizado o teste de queima. Teste que é realizado em condições normais de funcionamento com a alimentação de resíduos para verificar as emissões e a compatibilidade com a queima.

V - Relatório de Teste de Queima; - Aprovado o plano é realizado o teste e elaborado o relatório.

VI - Análise de Risco.

Na seção VIII são definidos os limites de emissões conforme o QUADRO 3.

QUADRO 3 - LIMITES MÁXIMOS DE EMISSÕES CONAMA 264/99

<b>Poluente</b>	<b>Limites Máximos De Emissão</b>
HCL	1,8 kg/h ou 99% de redução
HF	5 mg/Nm3 corrigido a 7% de O2
CO*	100 ppmv corrigido a 7% de O2
MP	70 mg/Nm3 farinha seca corrigido a 11% de O2
THC ( expresso como propano)	20 ppmv corrigido a 7% de O2
Hg	0,05 mg/Nm3 corrigido a 7% de O2
Pb	0,35 mg/Nm3 corrigido a 7% de O2
Cb	0,10 mg/Nm3 corrigido a 7% de O2
TI	0,10 mg/Nm3 corrigido a 7% de O2
(As+Be+Co+Ni+Se+Te)	1,4 mg/Nm3 corrigido a 7% de O2
(As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb)	7,0 mg/Nm3 corrigido a 7% de O2

\*As concentrações de CO na chaminé não poderão exceder a 100 ppmv em termo de média horária.  
 FONTE: CONAMA (1999)

Porém o artigo 29º permite que os padrões de emissão possam ser mais restritivos, sendo determinados pelos órgãos ambientais locais. Variações podem ocorrer pelas diferenças geográficas que alteram a capacidade de dispersão atmosférica pelas características climáticas, relevo. Outros fatores também podem influenciar como fatores de qualidade do ar e ocupação industrial.

Segundo o artigo 30º os limites de SOX e NOX serão definidos pelos órgãos regionais considerando peculiaridades locais.

A seção IX descreve o monitoramento de emissões. Os relatórios de auto-monitoramento serão realizados e encaminhados para o órgão licenciador na frequência por ele estipulada.

O monitoramento contínuo deve ser realizado nos seguintes parâmetros: pressão interna, temperatura dos gases do sistema forno e na entrada do precipitador eletrostático, vazão de alimentação do resíduo, material particulado (através de opacímetro), O<sub>2</sub>, CO, NOx e / ou THC quando necessário.

O monitoramento de forma não contínua deve ser realizado nos seguintes parâmetros: SOx, PCOPs, HCl/Cl<sub>2</sub>, HF, elementos e substâncias inorgânicas listados nos artigos 28, 29 e 30 descritos acima.

Outros monitoramentos podem ser exigidos pelo órgão ambiental competente.

Os resíduos também devem ser monitorados através de amostragem não contínua, fundamentada na análise dos seguintes parâmetros: Principais compostos orgânicos perigosos - PCOPs, elementos e substâncias inorgânicas, enxofre, flúor, série nitrogenada e cloro.

O monitoramento de efluentes líquidos e da área de entorno deverá ser realizado conforme legislação pertinente e conforme parâmetros definidos pelo órgão ambiental com base na avaliação de riscos à saúde humana, ao meio ambiente e os decorrentes de emissões acidentais.

Na seção X determina sobre as unidades de mistura e pré-condicionamento de resíduos, conhecidas como blendeiras. Devem apresentar informações detalhadas de toda estrutura física e processos operacionais bem como informações detalhadas dos resíduos recebidos e as tratativas dadas a cada um, visando à segurança ambiental e ocupacional.

O artigo 40º ainda determina que o responsável deverá registrar toda anormalidade envolvendo derramamento ou vazamento de resíduos e fornecer ao órgão ambiental os estudos de avaliação dos eventuais danos ocorridos.

Além disso, está previsto na seção XI que todo o pessoal envolvido nos processos de mistura, pré-condicionamento e coprocessamento deve receber treinamentos periódicos em relação aos processos e situações de emergência.

A seção XII determina sobre os procedimentos para controle de recebimento de resíduos que devem ser previamente analisados para determinação de suas propriedades físico-químicas e registro das informações.

Resolução CONAMA nº 316/2002 - dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos e estabelece limites para a emissão de dioxinas e furanos no coprocessamento. Limites máximos de Dioxinas e Furanos: dibenzo-p-dioxinas e dibenzo-p-furanos, expressos em total de toxicidade equivalente TEQ da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-para-dioxina): 0,50ng/Nm<sup>3</sup>.

### **Legislações Estaduais**

Cada estado possui um órgão ambiental que pode ou não estabelecer limites e processos diferentes. Apenas os estados do Paraná, Rio Grande do Sul, São Paulo e Minas Gerais possuem legislações locais restringindo ou detalhando procedimentos e limites da resolução CONAMA 264/99. Algumas diferenças estão descritas nas TABELAS 9 e 10.



No Paraná existe uma legislação específica para o coprocessamento: a CEMA 76/2009. Anteriormente o estado já possuía a SEMA 54/2006 que foi então substituída. Define padrões de resíduos para coprocessamento que estão detalhados no QUADRO 4. Um item interessante nesta legislação é a possibilidade de destruição térmica de resíduos caso outra solução não seja possível. Porém só serão aceitos resíduos gerados dentro do estado. Também define resíduos que não podem ser coprocessados além dos listados na CONAMA 264, são eles:

- solos contaminados com agrotóxicos,
- lodo galvânico,
- lodos de fossa séptica ou esgotos sanitários “in natura”
- lodos com poder calorífico abaixo de 1000 kcal/kg

No Rio Grande do Sul a Resolução CONSEMA 02/2000 define parâmetros para uso de resíduos e combustíveis para a fabricação de cimento listados no QUADRO 4. Define padrões de emissão listados no QUADRO 5. Também descreve uma lista de resíduos permitidos para uso sem necessidade de aplicação da norma:

- Casca de Arroz
- Serragem de Madeira não tratada
- Bagaço de Cana de Açúcar
- Palha de Arroz, Trigo e Similares
- Casca de Acácia

Em São Paulo, a CETESB – Norma técnica P4.263 define parâmetros para uso de resíduos para o coprocessamento listados nos QUADROS 4 e 5 e exclui dos critérios de licenciamento deste procedimento às utilizações dos seguintes materiais:

- Resíduos vegetais provenientes de atividade agrícola, como bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz, etc.;
- Resíduos vegetais provenientes da indústria de transformação de produtos alimentícios, como cascas, bagaços de cítricos, cítricos utilizados para extração de óleos essenciais, etc.;
- Resíduos vegetais fibrosos provenientes da produção de pasta virgem e de papel;
- Resíduos de madeira, com exceção dos resíduos de madeira que possam conter compostos orgânicos halogenados ou metais pesados resultantes de tratamento com conservantes ou revestimento;

- Coque de petróleo e coques residuais da gaseificação de carvão;
- Briquetes de carvão e aqueles produzidos a partir de serragem;
- Sucatas de metais ferrosos e não-ferrosos, como pós, carepas, cavacos e limalhas, etc. (\*);
- Resíduos de materiais têxteis (\*);
- Resíduos de obras de construção civil e demolição;
- Resíduos de refratários, vidros, material têxtil, como mangas filtrantes e estopas, EPI's, borracha, cabos elétricos, plásticos, papel e papelão, óleos e graxas, com exceção daqueles passíveis de rerefino gerados na própria unidade co-processadora.

(\*) Classificadas como resíduos não perigosos pela NBR 10.004 da ABNT (BRASIL, 2004). A utilização dos materiais listados deve ser previamente autorizada pela CETESB.

A COPAM 154 /2010 em Minas Gerais também define parâmetros para o coprocessamento conforme QUADROS 4 e 5.

No QUADRO 4 estão apresentados os parâmetros e seus limites para uso de resíduos no coprocessamento. Podemos verificar que as duas legislações mais recentes definiram limites, porém o PCS é definido em todas as normas. A diferença entre os valores é significativa para os dois estados em todos os parâmetros exceto o Mercúrio (Hg).

O PCS também varia de forma significativa entre os estados, o Paraná, Minas Gerais e São Paulo possuem condições especiais em casos de baixo valor de PCS.

QUADRO 4 - LIMITES DE COMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS PARA COPROCESSAMENTO NO BRASIL

Órgão	Unidade	CEMA/PR 76/09	CONSEMA/ RS 02/00 <sup>(1)</sup>	CETESB/SP 263/03 <sup>(2)</sup>	COPAM/MG 154/10
$\Sigma$ Cd, Hg, Tl	mg/kg	200			100
Hg	mg/kg	10			10
$\Sigma$ As, Co, Ni, Se, Te	mg/kg	5000			1500
$\Sigma$ Sb, Cr, Sn, Pb, V	mg/kg				5800
Se	mg/kg	100			
Cr	mg/kg	5000			
Pb	mg/kg	5000			3000
PCB					50
PCS <sup>(3)</sup>	kCal/kg	1500	2700	2775	2000
PCS <sup>(4)</sup>	kCal/kg	1000 <sup>(5)</sup>	1620	Caso a caso	1500 <sup>(10)</sup>
$\Sigma$ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , CaO, MgO, K <sub>2</sub> O e Na <sub>2</sub> O <sup>(6)</sup>	%	>50			
$\Sigma$ Ca, Si, Al, Fe, F, S, K e Na <sup>(6)</sup>	%				>45
$\Sigma$ fluoretos, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , CuO, <sup>(6)(7)</sup>	%	0,5-30			
$\Sigma$ ZnO, Li <sub>2</sub> O, TiO <sub>2</sub> <sup>(6)(7)</sup>	%	>15	(8)	(9)	

1- Os limites são estabelecidos no licenciamento e os resíduos devem ser caracterizados.

2- Os limites são estabelecidos no licenciamento e os resíduos devem ser caracterizados segundo a NBR 10004 para verificação.

3- Limite mínimo para uso direto

4- Limite mínimo permitido para blendagem de resíduos.

5- Resíduos com valores menores também podem ser coprocessados, desde que não exista outra destinação possível e que o resíduo seja do estado do Paraná.

6- Limites para uso como matéria prima de substituição

7- Os dois fatores somados permitem o uso como matéria prima de substituição.

8- A CONSEMA define que “para que um resíduo seja utilizado como substituto de matéria prima, deve apresentar características químicas similares às matérias-primas normalmente empregadas na produção de clínquer, ou seja, deve ser composto, basicamente, por óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro, contemplando também, a presença de mineralizadores e/ou fundentes”.

9- A CETESB define que “para que um resíduo seja utilizado como substituto de matéria-prima, deve apresentar composição química similar à normalmente empregada na produção de clínquer”.

10- Limite para resíduos domiciliares tratados.

FONTE: O AUTOR (2013)

O QUADRO 5 apresenta os limites de emissões para os fornos de produção de clínquer. Podemos verificar que existem muitas diferenças nas condições de medição, como o valor de correção ( $O_2$ ), os parâmetros e seus limites exigidos.

QUADRO 5 - LIMITES EMISSÕES BRASIL

Parâmetro	CONAMA 264/99	CETESB/SP 263/03	CEMA/PR 76/09 SEMA/PR 54/06	CONSEMA/RS 02/00	COPAM/MG 154/10
Fator de Correção	7% de O <sub>2</sub>	10% de O <sub>2</sub>	7 %O <sub>2</sub>	7 %O <sub>2</sub>	11 %O <sub>2</sub>
Material Particulado <sup>(1)</sup>	70 mg/Nm <sup>3</sup> farinha seca corrigido a 11% de O <sub>2</sub>	70 mg/Nm <sup>3</sup> a 11% de O <sub>2</sub>	70 mg/Nm <sup>3</sup>	70 mg/Nm <sup>3</sup> corrigido a 11%de O <sub>2</sub> (base seca)	50 mg/Nm <sup>3</sup>
CO <sup>(1)</sup>	100 ppmv	CONAMA	CONAMA	100 ppmv	100 ppm
SO <sub>x</sub> <sup>(1)</sup>	Fixados pelo órgão ambiental no licenciamento	350 mg/Nm <sup>3</sup>	400-1200 mg/Nm <sup>3</sup> dependendo do teor de SO <sub>3</sub> da farinha	Fixados pelo órgão ambiental no licenciamento	280 - 1200 1.200 mg/Nm <sup>3</sup> , expresso como SO <sub>2</sub> - Dependendo do enxofre da matéria prima.
NO <sub>x</sub> <sup>(1)</sup>	Fixados pelo órgão ambiental no licenciamento	800 mg/Nm <sup>3</sup>	1000-1400 mg/Nm <sup>3</sup> dependendo do teor de N do combustível	Fixados pelo órgão ambiental no licenciamento	450 mg/Nm <sup>3</sup>
Ácido Clorídrico (HCl) <sup>(1)</sup>	1,8 kg/h ou 99% de redução	10,0 mg/Nm <sup>3</sup>	1,8 kg/h ou 99% remoção de HCl para resíduos com mais de 0,5% de Cloro	1,8 kg/h ou 99%de redução	1,8 k/h ou 99% de remoção de HCl para resíduos que contenham mais de 0,5% de Cloreto
Ácido Fluorídrico (HF) <sup>(1)</sup>	5 mg/Nm <sup>3</sup>	4,0 mg/Nm <sup>3</sup> a 10% de O <sub>2</sub>	5 mg/Nm <sup>3</sup>	5 mg/Nm <sup>3</sup>	5 mg/Nm <sup>3</sup>
Cd + Tl		0,05 mg/Nm <sup>3</sup> a 10% de O <sub>2</sub>			
Cd	0,10 mg/Nm <sup>3</sup>		0,1 mg/Nm <sup>3</sup>	0,10 mg/Nm <sup>3</sup>	
Tl	0,10 mg/Nm <sup>3</sup>		0,1 mg/Nm <sup>3</sup>	0,10 mg/Nm <sup>3</sup>	
Hg	0,05 mg/Nm <sup>3</sup>	0,04 mg/Nm <sup>3</sup>	0,05 mg/Nm <sup>3</sup>	0,05 mg/Nm <sup>3</sup>	
Pb	0,35 mg/Nm <sup>3</sup>	0,275 mg/Nm <sup>3</sup>	0,35 mg/Nm <sup>3</sup>	0,35 mg/Nm <sup>3</sup>	
As + Co + Ni + Se + Te + Be	1,4 mg/Nm <sup>3</sup>	1,0 mg/Nm <sup>3</sup>	1,4 mg/Nm <sup>3</sup>	1,4 mg/Nm <sup>3</sup>	
Pb + As + Co + Ni + Se + Te + Be + Cr + Mn + Sb + Sn + Zn		5,0 mg/Nm <sup>3</sup>			

Continua

Parâmetro	CONAMA 264/99	CETESB/SP 263/03	CEMA/PR 76/09 SEMA/PR 54/06	CONSEMA/RS 02/00	COPAM/MG 154/10
As+Co+Ni+Te+Se+Be+Sb+ Cr+Cu+Sn+Mn+Zn+Pb			7,0 mg/Nm <sup>3</sup>	7,0 mg/Nm <sup>3</sup>	
As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni +Pb+Sb	7,0 mg/Nm <sup>3</sup>				
THC (expresso como propano) <sup>(1)</sup>	20 (médio horário) 500ppmv (máx)	20 ppmv	20 ppmv corrigido a 7% de O <sub>2</sub>	20 ppmv	20 ppmv a 7%
Dioxinas e furanos (FTEQ)	<sup>(2)</sup>	0,1 ng/Nm <sup>3</sup> a 11% de O <sub>2</sub>	0,14 ng/Nm <sup>3</sup>	<sup>(2)</sup>	<sup>(2)</sup>
Tolueno, Etilbenzeno, Xileno					100 mg/Nm <sup>3</sup> , para fluxo de massa maior ou igual a 100 g/h
Benzeno					20 mg/Nm <sup>3</sup> , para fluxo de massa maior ou igual a 100 g/h

1. Parâmetros monitorados continuamente. Parâmetros operacionais também devem ser monitorados.
  - a. CONAMA – Deve se também monitorar: pressão interna, temperatura dos gases do sistema forno e na entrada do precipitador eletrostático e vazão de alimentação do resíduo. O THC deve ser monitorado quando necessário.
  - b. CETESB – Deve se também monitorar o O<sub>2</sub>, alimentação do resíduo, consumo de combustível, alimentação de farinha, temperatura do forno, temperatura no ponto de alimentação do resíduo, parâmetros operacionais dos equipamentos de controle de poluição. Um relatório semestral e um teste de queima bienal devem ser entregues.
  - c. CEMA – Deve se monitorar também: pressão interna, temperatura no forno e no precipitador, vazão de alimentação de resíduos e O<sub>2</sub>. Dioxinas devem ser monitoradas no período bienal.
  - d. CONSEMA – Deve se também monitorar: pressão interna e temperatura dos gases do sistema forno, vazão de alimentação do resíduo, O<sub>2</sub> e opacidade na chaminé.
  - e. COPAM – Deve se também monitorar: O<sub>2</sub>
2. CONAMA e COPAM- Não apresentam limites. CONSEMA - Dioxinas e furanos não são obrigatoriamente monitorados, porém pode ser exigido pelo órgão.

FONTE: O AUTOR (2013)

Os metais listados no QUADRO 5 serão monitorados de forma descontínua, e podem ou não ser acrescentados de outros parâmetros dependendo do processo de licenciamento. O CONAMA, CEMA e a CONSEMA, solicitam que os PCOP's também sejam monitorados de forma descontínua. São relatórios semestrais onde são apresentadas as informações de monitoramento.

### **ALEMANHA**

Assim como o Brasil, a Alemanha é um país federativo que possui uma hierarquia da legislação, se dividindo em nível federal, estadual, municipal e outros níveis intermediários. Os órgãos ambientais são bem estruturados e, com isso, os processos de licenciamento menos centralizados. A maior parte dos licenciamentos é efetuado pelo órgão municipal ou por uma pequena região ("Kreis") de municípios pequenos (RIBEIRO, 1997).

Como a Alemanha faz parte da União Européia (UE), também está debaixo da legislação para os países membros. Porém, em grande parte, a Alemanha possui leis mais restritivas.

Um fator interessante é que o processo de licenciamento ambiental não tramita em paralelo com a autorização administrativa (RIBEIRO, 1997). Diferente do Brasil onde em um empreendimento, por exemplo, é necessário obter o alvará de funcionamento e o licenciamento ambiental em órgãos separados, lá se faz tudo em um processo único.

Na Alemanha foram instituídas leis federais para a área de meio ambiente. Leis que estabelecem limites e procedimentos, para que não haja margem para negociação de variações de limites de emissões em cada estado.

Na UE temos inúmeras diretivas na área de meio ambiente e em relação a resíduos e coprocessamento (algumas serão mencionadas neste capítulo). A Diretiva 75/442/CEE de 1975 estabelece que os países membros devem em primeiro lugar prevenir e reduzir a produção e a nocividade dos resíduos. Em segundo lugar devem aproveitar os resíduos por reciclagem, reuso, ou utilizar como fonte de energia. Também estabelece que a melhor tecnologia disponível deve ser utilizada, porém que não acarrete em custos excessivos.

A Diretiva 2000/76/EC se aplica a atividades de incineração e co-incineração de resíduos. Define que toda geração de resíduos deve ser minimizada e que o calor deve ser aproveitado pela queima de resíduos ao máximo. Também determina que nestas atividades a temperatura deve atingir 850°C para resíduos com tempo de

detenção de 2 segundos para resíduos não perigosos e de 1.100°C e 2 segundos de tempo de detenção para resíduos perigosos. Fazendo do coprocessamento uma ótima destinação dentre as tecnologias, pois supera todos estes itens. Além disso, define ainda os padrões de emissão descritos no QUADRO 7 e os procedimentos de monitoramento.

Para a blendagem de resíduos existe uma norma específica: a RAL GZ 724, que determina processos, concentrações e parâmetros para produção do combustível derivado de resíduo.

A incineração e o coprocessamento são regulamentados basicamente por duas leis: *Kreislaufwirtschaft – Abfallgesetz (Krw- / AbfG)* lei da reciclagem e do resíduo (ACHTERNBOSCH e BRÄUTIGAM, 2000).

Em paralelo, um grande número de outras leis se aplica a atividade de produção de cimento e coprocessamento. Entre elas estão: *Wasserhaushaltsgesetz (WHG)* Lei hídrica, *Bundes-Bodenschutzgesetz (BodSchG)*, lei de proteção do solo, *Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVGP)* Lei de avaliação de impacto ambiental, *Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)* Lei de proteção à natureza, *Baugesetzbuch – (BauGB)* Leis para construção, *Raumordnungsgesetz (ROG)* Lei de planejamento regional (zoneamento) (ACHTERNBOSCH e BRÄUTIGAM, 2000).

A regulamentação da lei de controle da poluição 4. *Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)* estabelece os estabelecimentos que necessitam de licenciamento ambiental.

Este trabalho direciona a abordagem as áreas de emissões e de composição dos resíduos, utilizados como matérias primas e combustíveis de substituição. A *Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)*, normativa técnica para pureza do ar assim como a 17. *Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)* lei federal de controle da poluição, regulamentam padrões de imissão e emissão.

Existem também organizações que podem indicar valores e procedimentos. A VDZ – *Verein Deutscher Zementwerke* é a Associação de empresas de cimento da Alemanha e possui relatórios de novas tecnologias e procedimentos para o setor. A EURITS - *European Union for Responsible Incineration and Treatment of Special Waste*, (União Européia para Tratamento e Incineração Responsável de Resíduos Especiais), outra associação do setor, que conta com a participação de empresas de 12 países, (EURITIS, 2013) também publicou possíveis limites para resíduos utilizados no coprocessamento conforme QUADRO 6 (GENDEBIEN, 2003).



O estado alemão de Nordrhein-Westfalen (NRW) elaborou um guia para práticas de coprocessamento (*Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zement-, Kalk- und Kraftwerken in Nordrhein-Westfalen*) onde descreve tabelas de referência com limites para composição de resíduos (QUADRO 6), utilizadas como base para emissão de licenças ambientais (NRW UMWELT, 2005).

O QUADRO 6 apresenta alguns limites para elementos presentes em resíduos utilizados no coprocessamento. Podemos verificar que os limites são similares, porém alguns parâmetros variam entre a EURITS e as demais.

QUADRO 6 - LIMITES COMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS PARA COPROCESSAMENTO NA ALEMANHA

Órgão	Unidade	DE-NRW		RAL-GZ724		EURITIS
Parâmetro		Médio	Máximo	Média	Máximo	
Cl	%					0,5
S	%					0,4
Ni	%					0,7
F	%					0,1
Cd	mg/kg	4	9	4		2
Tl	mg/kg	1	2	1		2
Hg	mg/kg	0,6	1,2	0,6		
As	mg/kg	5	13	5		
Co	mg/kg	6	12	6		
Ni	mg/kg	50- 80	100-160	25	80	
Sb	mg/kg	50	120	50		
Pb	mg/kg	70-190	200-400	70	190	
V	mg/kg	10	25	10		
Sn	mg/kg	30	70	30		
As, Se (Te), Cd, Sb	mg/kg					10
V, Cr, Co, Ni, Cu, Pb, Mn, Sn	mg/kg					200
Se	mg/kg	3	5			
Cr	mg/kg	40-125	120-250	40	125	
Cu	mg/kg	120-350 <sup>(2)</sup>	300-700 <sup>(2)</sup>	120	350	
Mn	mg/kg	50-250	100-500	25	80	
Br	%					0,01
Be	mg/kg					1
Mo	mg/kg					20
Cinzas	%					5
PCS	kJ/kg	20.000 ± 2.000				15.000
PCS <sup>(1)</sup>	kJ/kg	16.000				

1- Limites para resíduos de origem domiciliar 2- Pela heterogeneidade presente nos resíduos.

FONTE: O AUTOR (2013)

O QUADRO 7 apresenta os limites de emissões para os fornos de clínquer. Os limites são similares nas legislações apresentando coerência entre os órgãos. Apenas alguns somatórios e o número de metais são diferentes impossibilitando a comparação direta.

Os metais listados no QUADRO 7 são monitorados de forma descontínua, e podem, ou não, ser acrescentados de outros parâmetros dependendo do processo de licenciamento. A diretiva 2000/76 exige no mínimo de duas medições anuais dos metais pesados, dioxinas e furanos; serão, todavia, efetuadas medições pelo menos de três em três meses nos primeiros 12 meses de funcionamento. Os Estados-Membros podem determinar os períodos de medição logo que tenham estabelecido os valores-limite de emissão dos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos ou outros poluentes. São relatórios semestrais em que são apresentadas as informações de monitoramento. No guia DE-NRW devem ser anualmente monitorados clorobenzeno, clorofenol, cloronaftaleno, BTEX, PAK's, dioxinas e furanos.

QUADRO 7 - LIMITES EMISSÕES ALEMANHA

Parâmetro	Unid.	2000/76/CE <sup>(1)</sup>		17 BImSchV <sup>(5)</sup>	TA Luft	DE - NRW
Fator de Correção O <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	10% - 273 K		11%	10%	11%
Material Particulado <sup>(6)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>		10 – 30	10 – 30	20	20
CO <sup>(6)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>		50- 100 -150 <sup>(2)</sup>	50 – 100		
SOx <sup>(6)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	50	50 – 200	50	350	400
NOx <sup>(6)</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	500-800 <sup>(3)</sup>	200-400 <sup>(4)</sup>	200 – 400	500	500
COT <sup>(6)</sup>	Mg/Nm <sup>3</sup>	10	10 – 20	10-20		
Ácido Clorídrico (HCl)	mg/Nm <sup>3</sup>	10	10 – 60	10 – 60	30	10
Ácido Fluorídrico	mg/Nm <sup>3</sup>	1	1 – 2 - 4	1- 4	3	1
Cd + TI	mg/Nm <sup>3</sup>	0,05	0.05 - 0,1	0,05		0,05
Cd	mg/Nm <sup>3</sup>					0,05
TI	mg/Nm <sup>3</sup>				0,05	
Hg	mg/Nm <sup>3</sup>	0,05	0,05 -0,1	0,03 – 0,05	0,05	0,03
Sb + As + Pb + Cr + Co + Cu + M n + Ni + V	mg/Nm <sup>3</sup>	0,5	0,5 – 1			
Sb + As+ Pb + Cr + Co + Cu + M n + Ni + V + Sn	mg/Nm <sup>3</sup>			0,5		0,5
Pb+Co+Ni+Se+Te	mg/Nm <sup>3</sup>				0,5	
Sb, Cr, Cu, Mn, V, Sn, Cianeto, Fluoreto	mg/Nm <sup>3</sup>				1	
As, Cd, Cr(VI), Benzo(a)pireno	mg/Nm <sup>3</sup>				0,05	
As, Cd, Cr(VI), Co Benzo(a)pireno				0.05		
Dioxinas e furanos (FTEQ)	ng/Nm <sup>3</sup>	0,1	0,1	0,1	0,1 ou 0,25µg/h	0,5
Benzeno	mg/Nm <sup>3</sup>				1	

- 1- A coluna da esquerda é para fábricas que utilizam resíduos para gerar menos de 40% do calor e a da direita mais de 40%. Quando aparecem dois valores o menor é para o valor médio diário correspondente a 97% do tempo e valor médio de 30 min. O maior valor corresponde ao limite máximo. Quando aparecem 3 valores o menor é a média diária, o mediano é o valor médio de 30 min. a 97% do tempo e o maior é o valor máximo.
- 2- 50 valor médio diários, 100 valor para as médias diárias de 30 min. e 150 para 95% de todas as medidas de 10min.
- 3- 500 para fábricas novas e 800 para fábricas antigas.
- 4- 200 para capacidade maior que 6t/hora ou instalações novas e 400 para capacidade inferior a 6t/hora. As autoridades podem licenciar valores maiores para casos específicos.
- 5- Os valores menores são para as médias diárias e os maiores para limites de médias de 30 min.
- 6- Parâmetros monitorados continuamente.
  - a. 2000/76/CE – Deve se monitorar também temperatura próximo da parede interna ou de outro ponto representativo da câmara de combustão, tal como autorizado pela autoridade competente, concentração de oxigênio, pressão, temperatura, e teor em vapor de água dos gases de escape.
  - b. 17 BlmSchV – Deve se monitorar também: HCl, HF, Hg, O<sub>2</sub>, temperaturas no forno e umidade, pressão, temperatura e vazão do gás na saída. A partir de 2016 os valores exigidos para NO<sub>x</sub> serão de 100 mg/Nm<sup>3</sup>
  - c. TA Luft - Dependendo da concentração de cada fábrica podem ser exigidos o monitoramento de HCl, HF, substâncias cloradas, sulfeto de hidrogênio (ácido sulfídrico)
  - d. DE-NRW – Deve se monitorar também: O<sub>2</sub>, vazão, temperatura de saída do gás, taxa de alimentação do forno e Hg.

FONTE: O AUTOR (2013)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para elaboração deste trabalho foram levantadas informações operacionais, técnicas e legais da destinação final de resíduos na tecnologia de coprocessamento na Alemanha e no Brasil.

Com o objetivo de aprofundar a pesquisa realizou-se um estágio de quatro semanas em uma fábrica de cimento no estado de Baden Württemberg- Alemanha que possui altíssimos índices de utilização de resíduos para coprocessamento. O nome da empresa e as informações técnicas foram mantidas em sigilo a pedido da empresa. Vivenciar o funcionamento de toda área operacional foi de grande utilidade para realizar o comparativo entre o coprocessamento alemão e brasileiro.

As legislações aplicáveis foram comparadas para apontar as diferenças. Regulamentações vigentes na Alemanha foram utilizadas para efetuar a comparação de viabilidade de destinação para coprocessamento de resíduos brasileiros. Para isso utilizou-se laudos analíticos de resíduos de empresas brasileiras conforme exemplo no Anexo II. A partir da experiência profissional do autor, levantou-se 5 grupos diferentes de resíduos industriais. Para cada grupo foram selecionados 5 resíduos diferentes. Os laudos utilizados foram realizados por laboratório externo seguindo as normas descritas no anexo I e as informações de identificação foram mantidas em sigilo a pedido das empresas envolvidas.

## 4. DISCUSSÃO DO COPROCESSAMENTO NO BRASIL E NA ALEMANHA

### 4.1 LEGISLAÇÃO E NORMAS REGULAMENTADORAS NO BRASIL E NA ALEMANHA

A legislação é um dos pontos chave para entendermos as diferenças entre a tecnologia de coprocessamento nos dois países, pois regulamenta a operação em vários detalhes. Boa parte dos avanços tecnológicos nos últimos anos se deu pela necessidade de ajustamento nas questões ambientais ou de operação para utilização de combustíveis de substituição.

A legislação reflete a realidade e maturidade de uma sociedade. A questão ambiental na Alemanha é muito mais desenvolvida. Como exemplo podemos verificar a questão dos aterros. No Brasil, de acordo com a Lei no 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, os lixões deverão ser extintos até 2014 e substituídos por aterros, que só poderão receber os resíduos depois que tiverem sido esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação. Já na Alemanha, desde 2009, os aterros não recebem mais resíduos domiciliares, são destinados apenas os resíduos que possuam 5% de orgânicos em sua composição (TA SIEDLUNGSABFALL, 1993). Enquanto na Alemanha a tecnologia já foi utilizada, testada e agora minimizada, no Brasil ainda está sendo instalada. Apesar das posições ideológicas e técnicas divergentes ao redor da terra quanto à utilização do aterro como alternativa de destinação, este fato demonstra o quanto o Brasil precisa avançar na temática dos resíduos.

A descentralização, que dá autoridade e autonomia para órgãos regionais, existe nos dois modelos, buscando a proximidade do órgão com a área de atuação. Este ponto é muito positivo na realidade alemã: o licenciamento ambiental é realizado junto com as outras licenças como segurança, fiscais, alvará de funcionamento, etc. O interessado em obter as autorizações possui contato com apenas um órgão que é responsável por desenrolar todas as etapas do processo de licenciamento. No Brasil a realidade da descentralização é apenas para as grandes cidades. A grande maioria das cidades não possui órgão ambiental. O órgão

estadual assume, então, o papel de licenciar. Além disso, no Brasil a licença ambiental é um processo separado de outras etapas.

Outro fator interessante é a maturidade da legislação. A Alemanha já iniciou sua preocupação ambiental em 1970, e atualmente possui limites ambientais mais rígidos do que a União Européia. Porém, como um país industrializado há mais tempo, a Alemanha possui desafios ambientais enormes com as áreas contaminadas pelas indústrias ao longo das décadas de produção sem limites ambientais, e de guerras que destruíram muitas fábricas contaminando as áreas onde estavam instaladas. O Brasil, apesar de não possuir tantas áreas contaminadas, ainda está com problemas básicos de saneamento e destinação de resíduos.

No QUADRO 8 podemos verificar algumas diferenças e semelhanças entre os dois sistemas de legislação e aspectos do direito ambiental nos dois países.

QUADRO 8 - COMPARAÇÃO DO DIREITO AMBIENTAL ALEMANHA BRASIL

País	Alemanha	Brasil
<b>Estrutura para aplicação das leis</b>	Competência federal, regional e municipal. Regulação feita pelo Ministério do Meio Ambiente e Segurança Nuclear e por agências regionais	Competência comum da União, Distrito Federal, estados e municípios. Regulação feita pelo Ministério do Meio Ambiente, IBAMA e secretarias do Meio Ambiente estaduais e municipais.
<b>Diretrizes básicas da legislação</b>	As preocupações ambientais iniciaram-se nos anos 1970 com a criação de diversos departamentos de meio ambiente em diferentes ministérios até a unificação do tema sob o Ministério do Meio Ambiente, em 1986. A proteção ambiental no país feita por uma série de leis nacionais, aprovadas em 1990, para água, resíduos, emissões e licenciamento ambiental. Entretanto, normas da União Européia estão sendo introduzidas gradualmente. Cerca de 80% da legislação ambiental já é do bloco europeu	Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) – Lei 6938, de 1981. Instituiu uma rede de órgãos governamentais conhecida como Sistema Nacional de Meio Ambiente (Sisnama) e consolidou a obrigação de licenciamento prévio de atividades potencialmente poluidoras

Continua

<b>País</b>	<b>Alemanha</b>	<b>Brasil</b>
<b>Regras mais restritivas</b>	As normas para emissão de licenças de operação são as mais rígidas, bem acima dos padrões europeus. Os regulamentos mais restritivos referem-se ao setor de energia nuclear e a contaminação do solo, já que, independente de quem causou a poluição, o proprietário de uma terra contaminada é obrigado a fazer a reparação do dano.	Restrição ao corte de vegetação em áreas rurais. Zoneamento urbano (municípios) e regras sobre bacias aéreas (zonas que não comportam aumento do nível de emissões atmosféricas).
<b>Órgãos responsáveis pelo licenciamento ambiental</b>	De acordo com a lei de Avaliação Ambiental do País, a Agência Ambiental Alemã é responsável pela avaliação do Impacto Ambiental. Contudo, a maioria dos projetos é conduzida pelas agências regionais	O IBAMA licencia empreendimentos cujo impacto potencial tenha alcance nacional, internacional ou regional (dois ou mais estados). O órgão estadual atua em caso de impacto potencial em dois ou mais municípios e, o órgão municipal, dentro dos limites de um só município.
<b>Principais desafios</b>	Principalmente na porção oriental da Alemanha, as instalações industriais contaminadas e questões ligadas à descontaminação de solo são obstáculos que as agências ambientais precisam vencer. A redução das emissões de CO <sub>2</sub> e o desenvolvimento e a distribuição de fontes de energia renovável são outros focos de atenção	As desigualdades regionais existentes na infra-estrutura de saneamento fazem com que a universalização e a melhoria dos serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, coleta de lixo e drenagem figurem entre os principais objetivos a serem alcançados pelo Estado. De acordo com o IBGE, a quantidade de lixo que recebe destinação final adequada no Brasil, por exemplo, ainda é menos da metade do total, e o percentual do esgoto coletado que recebe algum tipo de tratamento é baixo, em torno de um terço. Outro grande desafio refere-se ao desmatamento, que não atinge somente a Amazônia como também outros biomas, como a caatinga, a Mata Atlântica e o cerrado. O Brasil ainda é o quarto maior emissor de gases do efeito estufa no mundo.

FONTE: ANÁLISE EDITORIAL(2007) - adaptado



A legislação ambiental no Brasil é vista como restritiva e moderna, porém a sua implementação muitas vezes não é vista pela deficiência das estruturas de fiscalização, falta de recursos, lentidão das agências ambientais entre outros fatores. (ROSSIN, 2006)

No coprocessamento podemos verificar, na prática, esta diferença entre os dois países. Conforme o QUADRO 9, verifica-se os limites alemães com diferenças em relação à composição dos resíduos utilizados. Encontram-se diferenças de 75% até 40% no poder calorífico e grandes diferenças nos limites para metais de 833% a 12.500%.

QUADRO 9 – COMPARAÇÃO LIMITES COMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS PARA COPROCESSAMENTO

		BRASIL		ALEMANHA				
Órgão	Unidade	CEMA 76	Copam 154/2010	Leitfaden Tab 1.1		RAL-GZ724		EURITIS
Parâmetro				Prática	Máximo	Prática	Máximo	
Cl	%							0,5
S	%							0,4
F	%							0,1
Cd	mg/kg			4	9	4		2
Tl	mg/kg			1	2	1		2
Cd, Hg, Tl	mg/kg	200	100					
Hg	mg/kg	10	10	0,6	1,2	0,6		
As	mg/kg			5	13	5		
Co	mg/kg			6	12	6		
Ni	mg/kg			50	100	25	80	70
As, Co, Ni, Se, Te	mg/kg	5000	1500					
Sb	mg/kg			50	120	50		
V	mg/kg			10	25	10		
Sn	mg/kg			30	70	30		
Sb, Cr, Sn, Pb, V			5800					
As, Se (Te), Cd, Sb	mg/kg							10
V, Cr, Co, Ni, Cu, Pb, Mn, Sn	mg/kg							200
Se	mg/kg	100						
Cr	mg/kg	5000		40-125	120-250	40	125	
Pb	mg/kg	5000	3000	70-190	200-400	70	190	
Cu	mg/kg			123-350**	300-700**	120	350	
Mn	mg/kg			50-250	100-500	25	80	
Br	%							0,01
Be	mg/kg							1
Cinzas	%							5
PC	kCal/kg	1500 – 2775	2000	4784,689				3588,517
PC*	kCal/kg	1000 – 1620	1500	3827,751				0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , CaO, MgO, K <sub>2</sub> O e Na <sub>2</sub> O	%	50						
Ca, Si, Al, Fe, F, S, K e Na	%		45					
fluoretos, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , CuO,	%	0,5-30						
ZnO, Li <sub>2</sub> O, TiO <sub>2</sub>	%	15						

\*Verificar QUADRO 4

FONTE: O AUTOR (2013)

Não vemos limites na legislação alemã para utilização de resíduos como matéria-prima de substituição. Estes materiais devem ser licenciados separadamente e sua composição é avaliada pelo órgão ambiental. Alguns estados brasileiros adotam o mesmo procedimento.

A CETESB/SP e a CONSEMA/RS no Brasil apresentam uma lista de resíduos passíveis de utilização, facilitando o processo de destinação e diminuindo o volume de processos no órgão ambiental.

No estado de Nordrhein Westfalen na Alemanha também existe uma lista de resíduos para os quais a destinação de coprocessamento é facilitada, principalmente no controle de qualidade das fábricas. A lista é composta por 34 grupos de resíduos, que possuem suas análises de caracterização disponibilizadas para comparação e adequação (NRW UMWELT, 2005). Foi verificado que as fábricas devem solicitar autorizações ambientais para cada tipo de resíduo que será utilizado, e então são estabelecidos os limites de recebimento para estes resíduos. Para conformidade com a licença, a fábrica deve possuir um sistema de controle de qualidade. São amostras frequentes. Além de uma amostra média diária por resíduo, cada gerador deve ser monitorado em uma proporção mínima de uma amostra para cada 100 toneladas ou uma amostra semanal quando o volume for menor que 100 toneladas. Existem valores para limites máximos e médios. Metade, 50%, das amostras podem estar fora dos limites médios. Quando alguma amostra possui parâmetros fora do limite da média diária, mas dentro do limite máximo, poderá ser utilizado. Este procedimento é interessante para uso de resíduos, pois a variação de composição somados a possíveis falhas de amostragem potencializam a variação de composição das amostras.

O padrão RAL- GZ724 é um padrão de qualidade para combustíveis derivados do resíduo (CDR), então não é necessariamente compatível para destinação de resíduos como lodos, solventes, águas contaminadas, etc. Porém identifica os contaminantes que devem ser controlados e aponta um valor de concentração de um tipo de combustível de substituição utilizado pelas cimenteiras.

Os limites utilizados na Alemanha são similares ou inferiores aos de combustíveis tradicionais utilizados por décadas nas fábricas de cimento. Apenas alguns metais possuem limites maiores nos resíduos, são eles o Ni, Cr, Sb, Sn e o Cu.

O QUADRO 10 apresenta as legislações para emissões atmosféricas dos dois países e o QUADRO 11 é um resumo do QUADRO 10. Para uma melhor comparação, os valores de  $O_2$  de referência foram igualados para 11% de  $O_2$  conforme o procedimento descrito na SEMA/54.

QUADRO 10 - COMPARAÇÃO DAS LEGISLAÇÕES DE EMISSÕES BRASIL/ALEMANHA

Parâmetro	CONAMA 264/99	CETESB 263/03	SEMA 54/06 CEMA 76/09	CONSEM A 02/2000	COPAM 154/2010	2000/76/CE		17 BlmSchV	TA Luft	DE - NRW
Ano de Criação	1999	2003	2009	2000	2010	2000		1974	1986	2005
Fator de correção original (O <sub>2</sub> )	7%	10%	7 %	7 %	11 %	10%		11%	10%	11%
Material Particulado (mg/Nm <sup>3</sup> )	70	70	70	71,43	50	27,27	45,45	10 - 30	18,18	20
CO (ppmv / mgNm <sup>3</sup> )	71, 40	CONAMA	CONAMA	71,43	100	45,45	90,90 - 136,36	50 - 100		
SOx (mg/Nm <sup>3</sup> )		318,18	285-857 depende do teor de SO <sub>3</sub> da farinha	Fixados pelo órgão ambiental no licenciam ento	280 - 1200 1.200, Depende do enxofre da matéria prima.	45,45	45,45 - 181	50	318	400
NOx (mg/Nm <sup>3</sup> )		727,27	715-1000 depende do teor de N do combustív el	Fixados no licenciam ento	450	454,54- 727,27	181,81- 363.63	200 - 400	454	500

Continua

Parâmetro	CONAMA 264/99	CETESB 263/03	SEMA 54/06 CEMA 76/09	CONSEM A 02/2000	COPAM 154/2010	2000/76/CE		17 BlmSchV	TA Luft	DE - NRW
Ácido Clorídrico (HCl) (mg/Nm <sup>3</sup> )	1,80 kg/h ou 99% de redução	9,09	1,8 kg/h ou 99% de remoção de HCl para resíduos com mais de 0,5% de Cloro	1,8 kg/h ou 99%de redução	1,8 k/h ou 99% de remoção de HCl para resíduos com mais de 0,5% de Cloreto		9,09 - 54,54	10 - 60	27,27	10
Ácido Fluorídrico (HF) (mg/Nm <sup>3</sup> )	3,60	3,63	3,57	3,57	5		0,91	1-4	2,72	1
Cd + TI (mg/Nm <sup>3</sup> )		0,045					0,05	0,05		0,05
Cd (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,07		0,07	0,07					0,045	0,05
TI (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,07		0,07	0,07					0,045	
Hg (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,036	0,036	0,036	0,036			0,045	0,03		0,03
Pb (mg/Nm <sup>3</sup> )	0,25	0,25	0,25	0,25						
As + Co + Ni + Se + Te + Be (mg/Nm <sup>3</sup> )	1,00	0,91	1,00	1,00						
Pb + As + Co + Ni + Se + Te + Be + Cr + Mn + Sb + Sn + Zn (mg/Nm <sup>3</sup> )		4,54								
As+Co+Ni+Te+Se+Be+Sb+ Cr+Cu+Sn+Mn+Zn+ Pb (mg/Nm <sup>3</sup> )			5,0	5,0						
As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+ Pb+Sb (mg/Nm <sup>3</sup> )	5 mg/Nm <sup>3</sup>									

Parâmetro	CONAMA 264/99	CETESB 263/03	SEMA 54/06 CEMA 76/09	CONSEM A 02/2000	COPAM 154/2010	2000/76/CE		17 BlmSchV	TA Luft	DE - NRW
Sb + As, Pb + Cr + Co + Cu + M n + Ni + V (mg/Nm <sup>3</sup> )							0,45			
Sb + As, Pb + Cr + Co + Cu + M n + Ni + V + Sn (mg/Nm <sup>3</sup> )								0,5		0,5
Pb+Co+Ni+Se+Te (mg/Nm <sup>3</sup> )									0,45	
Sb, Cr, Cu, Mn, V, Sn, Cianeto, Fluoreto (mg/Nm <sup>3</sup> )									0,91	
As, Cd, Cr(VI), Benzo(a)pireno (mg/Nm <sup>3</sup> )									0,045	
THC (expresso como propano) ppmv	14,29 (médio) e 357,14 (máximo)	18,18	14,29	14,29	28					
Dioxinas e furanos (FTEQ) (ng/Nm <sup>3</sup> )		0,091	0,1				0,91	0,1	0,91 ou 0,23 µg/h	0,5
Tolueno, Etilbenzeno, Xileno (mg/Nm <sup>3</sup> )					100, para fluxo de massa maior ou igual a 100 g/h					
Benzeno (mg/Nm <sup>3</sup> )					20, para fluxo de massa maior ou igual a 100 g/h				1	

FONTE: O AUTOR (2013)

O QUADRO 11 apresenta a comparação dos limites de emissões atmosféricas dos dois países de forma resumida. Foram selecionados e comparados os valores máximos e mínimos de cada país.

QUADRO 11 - RESUMO DA COMPARAÇÃO DAS LEGISLAÇÕES DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS BRASIL/ALEMANHA

<b>Parâmetro</b>	<b>BRASIL</b>	<b>ALEMANHA</b>	<b>Diferença (%)</b>
<b>Ano de Criação</b>	1999 – 2010	1974 - 2005	
<b>Fator de Correção</b>	11% de O <sub>2</sub>	11% de O <sub>2</sub>	0
<b>Material Particulado</b>	50 - 70 mg/Nm <sup>3</sup>	10 - 45,45	500 – 154
<b>CO</b>	71,40-100 ppmv	45,45 - 136,36	157 - 73,33
<b>Sox</b>	285 – 1200	45,45 - 400	627 - 300
<b>NOx</b>	415 – 1000	181,81 - 500	229 - 200
<b>Ácido Clorídrico (HCl)</b>	9,09 mg/Nm <sup>3</sup> ou 1,8 kg/h ou redução de 99% para resíduos com mais de 0,5% de cloro	9,09 - 54,54	0
<b>Ácido Fluorídrico</b>	3,57 - 5,00 mg/Nm <sup>3</sup>	0,91 - 2,72	392 - 183
<b>Cd + TI</b>	0,045	0,05	90
<b>Cd</b>	0,07	0,045- 0,05	140
<b>TI</b>	0,07	0,045	155
<b>Hg</b>	0,036	0,03 - 0,045	77
<b>Pb</b>	0,25		
<b>As + Co + Ni + Se + Te + Be</b>	0,91 - 1,00		
<b>Pb + As + Co + Ni + Se + Te + Be + Cr + Mn + Sb + Sn + Zn</b>	4,54		
<b>As+Co+Ni+Te+Se+Be+Sb+Cr+Cu+Sn+Mn+Zn+Pb</b>	5		
<b>As+Be+Co+Cr+Cu+Mn+Ni+Pb+Sb</b>	5		
<b>Sb + As, Pb + Cr + Co + Cu + Mn + Ni + V</b>		0,45	

Continua



Parâmetro	BRASIL	ALEMANHA	Diferença (%)
Ano de Criação	1999 – 2010	1974 - 2005	
Sb + As, Pb + Cr + Co + Cu + M n + Ni + V + Sn		0,5	
Pb+Co+Ni+Se+Te		0,45	
Sb, Cr, Cu, Mn, V, Sn, Cianeto, Fluoreto		0,91	
As, Cd, Cr(VI), Benzo(a)pireno		0,045	
THC (expresso como propano)	14,29-28 ppmv		
Dioxinas e furanos (FTEQ)	0,091 - 0,1 ng/Nm <sup>3</sup>	0,5 - 0,1	182 - 0
Tolueno, Etilbenzeno, Xileno	100 mg/Nm <sup>3</sup> , para fluxo de massa maior ou igual a 100 g/h		
Benzeno	20 mg/Nm <sup>3</sup> , para fluxo de massa maior ou igual a 100 g/h	1	2000
Média			321

FONTE: O AUTOR (2013)

O QUADRO 11 mostra a diferença percentual entre os limites, que é em média 321% maior no Brasil, ou seja, as fábricas brasileiras podem teoricamente emitir 3 vezes mais contaminantes do que uma fábrica alemã. Um dos fatores que leva a esta diferença é a presença de limites de médias diárias na Alemanha, os quais são mais baixos. A exemplo do controle da composição de resíduos utilizados como combustível, as emissões também possuem limites para médias diárias ou de meia hora, além do limite máximo. Isto corresponde com a necessidade de fábricas que utilizam resíduos como combustíveis, pois a qualidade e a uniformidade dos resíduos não é previsível como no caso de um combustível tradicional. Por isso este controle e esta flexibilidade são tão importantes para o setor.

Outro fator interessante é considerar o tamanho da bacia atmosférica dos dois países. O Brasil com 8.578.767 km<sup>2</sup> é aproximadamente 24 vezes maior do que a Alemanha com 357.051 km<sup>2</sup>. Se considerarmos as bacias como o corpo receptor os limites de emissão poderiam ser ainda maiores no Brasil.

Tanto a legislação brasileira como a alemã exigem licenciamento de resíduos destinados para coprocessamento por parte das fábricas. Porém, no Brasil, ao contrário da Alemanha, não são exigidos controles dos resíduos recebidos pelas cimenteiras, apenas dos geradores do resíduo. Milanez (2009) aponta para o risco de formação de novos compostos na mistura de resíduos na preparação, podendo ser a mistura final diferente do resíduo autorizado.

Apesar da legislação mais permissiva no Brasil, muitos resíduos industriais passíveis de valorização energética ainda são destinados em aterros. A visão de mercado brasileiro onde o coprocessamento é apenas uma destinação final de resíduos, onde o resíduo não é visto como um combustível de substituição, a burocracia e a grande diferença de custos dificultam o uso desta tecnologia.

Ambas as legislações são bem detalhadas no processo do coprocessamento. Limites e procedimento estabelecidos facilitam a utilização desta tecnologia. Porém em alguns casos estaduais a burocracia e falta de mão de obra especializada dificultam a destinação para coprocessamento, principalmente de pequenas gerações.

Milanez (2009) aponta para a necessidade de investimento em pessoal e infra-estrutura dos órgãos ambientais brasileiros, tornando-os mais técnicos e independentes de motivações políticas para que as atividades de coprocessamento possam ser mais bem monitoradas.

## 4.2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Para melhor entender as diferenças da tecnologia aqui estudada faz-se necessário apontar as diferenças da utilização do coprocessamento nos dois países. Embasados nos dados de Brasil e Alemanha, a fim de facilitar a análise, foram elaboradas tabelas que mostram as características de cada um comparativamente.

A FIGURA 11 mostra o crescimento do coprocessamento ao longo dos anos no Brasil. Entre o ano de 1991 e 2011 foram coprocessados 8 milhões de toneladas, mas apenas no ano de 2011 foram coprocessadas 1,16 milhão de toneladas de resíduos. O potencial estimado das indústrias em 2011 era de 2,5 milhões (ABCP, 2013). Percebe-se, portanto, o quanto essa tecnologia pode crescer no país.

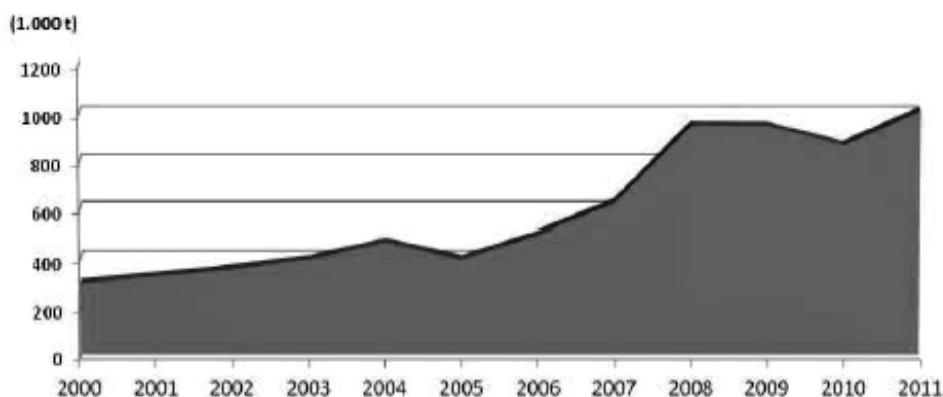


FIGURA 11- EVOLUÇÃO DO COPROCESSAMENTO NO BRASIL  
 FONTE: ABCP, 2013

O QUADRO 12 mostra que apenas 18% dos resíduos industriais são coprocessados. Os aterros no Brasil continuam recebendo o maior volume de resíduos, 76%. Conforme TABELA 1 verificamos que 90% dos resíduos domiciliares vão para aterros, aterros controlados ou lixões. Boa parte destes resíduos aterrados poderiam ser aproveitados energeticamente.

QUADRO 12 - QUANTIDADE DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS (RSI) POR TECNOLOGIA DE DESTINAÇÃO NO BRASIL – BASE 2008

Tecnologia	Quantidade de RSI Tratados (%)
Aterro para Classe I e II	76
Coprocessamento em Fornos de Cimento	18
Incineração e outros tratamentos térmicos	3
Tratamentos Biológicos e outros	3

FONTE: DEL BEL E SALGOSA (2012)

Enquanto na Alemanha os resíduos urbanos são utilizados largamente como combustível, chegando a 11% do volume de resíduos utilizados no coprocessamento (VDZ, 2012), no Brasil o primeiro projeto foi em 2009 na unidade de Santa Galo do grupo Lafarge (BRANCO, 2009).

Conforme a TABELA 7, verifica-se que o potencial de crescimento do coprocessamento no Brasil é enorme. Apesar do país produzir quase o dobro de cimento, ainda coprocessa menos da metade do que a Alemanha. A indústria brasileira de cimento é composta por 14 grupos industriais que reúnem 80 unidades de produção espalhadas pelo país, sendo 29 delas de moagem e 51 unidades integradas (com forno). Dessas, 36 estão licenciadas para coprocessar resíduos pelas agências ambientais estaduais competentes. Várias outras se encontram em

processo de licenciamento. No Brasil são coprocessados um pouco mais de 1 milhão de toneladas de resíduos por ano. No entanto a capacidade de eliminação de resíduos pela indústria brasileira de cimento chega a 2,5 milhões de toneladas (ABCP, 2013). Estes valores ainda são muito baixos se comparados aos da Alemanha na TABELA 7. O país germânico possui 22 grupos de cimento e 53 fornos que produziram 33,5 milhões de toneladas de cimento em 2012 e que coprocessaram 3,06 milhões de toneladas de resíduos em 2011. O volume de resíduo coprocessado equivale a 2,4 milhões de toneladas de carvão mineral, correspondendo a mais de 61% da demanda de combustíveis na produção de cimento (VDZ, 2012).

Tabela 7 - SETOR DE CIMENTO E COPROCESSAMENTO BRASIL ALEMANHA

	<b>BRASIL</b>	<b>ALEMANHA</b>
<b>Grupos</b>	14	22
<b>Fábricas</b>	80	54
<b>Unidades com fornos</b>	51	53
<b>Cimento produzido (milhões t/ano) 2012</b>	68	32,4
<b>Cimento produzido (milhões t/ano) 2011</b>	63	33.5
<b>Ranking produtores de cimento no mundo</b>	5°	13°
<b>Resíduo utilizado para Coprocessamento (milhões t/ano) 2011</b>	1,16	3,06
<b>Proporção de resíduo coprocessado/ cimento produzido</b>	1,8%	9,1%
<b>Volume de clínquer produzido por sistema seco.</b>	99 %	94%

Fontes: O AUTOR (2013); CNI/ABCP (2012) ;ABCP(2013) ; CEMBUREAU (2012);VDZ(2011) e (2012)

A TABELA 7 também mostra que o Brasil está tecnologicamente à frente da Alemanha nos processos de fabricação, produzindo 99% do cimento em processos secos que são energeticamente mais eficientes. Segundo Karstensen(2006), tecnologias antigas, poluentes e menos competitivas são substituídas ao longo dos anos. A indústria de cimento é dominada por grandes grupos internacionais que possuem políticas de qualidade, segurança e meio ambiente que são entendidas para todas as fábricas. Estes fatores contribuem para que mesmo no Brasil, um país em desenvolvimento, as fábricas sejam construídas e mantidas com as melhores tecnologias disponíveis (KARSTENSEN, 2006).

A modernização e a adequação das fábricas com as melhores técnicas disponíveis (MTD) que substituem fornos, os quais agora possuem pré-aquecedores e pré-calcinadores entre outros equipamentos específicos (essenciais para a introdução de diferentes tipos de resíduos sem afetar a qualidade do cimento produzido) indicam que o setor possui ainda mais potencial de crescimento para o coprocessamento (ROCHA, 2011).

#### 4.3 APLICAÇÃO PARA RESÍDUOS INDUSTRIAIS

Resíduos industriais são de composição muito variada. Dependem das inúmeras variações de processo gerador, insumos utilizados, reações químicas dos processos e matérias-primas específicas utilizadas. Estes fatores podem contribuir para que se enquadrem em combustíveis de substituição e/ou como substitutos de matéria-prima. Também os tornam perigosos, pois concentram substâncias incomuns e muitas vezes de alto grau de periculosidade.

Para comparar a possibilidade de coprocessamento de resíduos brasileiros na realidade alemã, foram escolhidos 5 grupos de resíduos recorrentes na realidade da indústria brasileira. A escolha dos grupos foi feita com base na experiência de mercado do autor. Dentro de cada grupo foram selecionados 5 análises laboratoriais de resíduos diferentes de indústrias. Todos os resíduos selecionados foram aprovados para destinação em coprocessamento no estado do Paraná, portanto atenderam os limites exigidos da CEMA 76/09.

Das legislações apresentadas nos subcapítulos 2.3 e 4.2 foram definidos quais parâmetros foram comparados e qual norma utilizada. Os dados foram tabelados e comparados em relação ao guia do estado de Nordrhein-Westfalen, denominado DE-NRW nas tabelas desta seção, pois é utilizado com base para licenciamento e possui parâmetros para comparação.

Em relação aos dados apresentados nas análises dos resíduos, verifica-se que os limites de detecção dos equipamentos utilizados são maiores que os limites da legislação alemã, impossibilitando uma análise precisa nestes parâmetros. Estas diferenças foram encontradas nos seguintes parâmetros: Antimônio (Sb), Cobalto (Co), Estanho (Sn), Vanádio (V), Tálho (Tl) e para o Telúrio (Te). Nas tabelas estes

metais foram colocados em *itálico* para destaque. As normas utilizadas para análise estão no anexo I.

O parâmetro de poder calorífico apresenta valores muito baixos em relação aos valores que aparecem nas bibliografias. Não foi constatado o motivo desta diferença, podendo ser relativo ao método utilizado.

Os valores de limites de quantificação (LQ) podem variar nos caso em que a análise não foi realizada no mesmo laboratório.

Os parâmetros verificados acima dos limites alemães foram destacados em **negrito**.

#### 4.3.1 Águas Contaminadas

Resíduos com origem em acidentes ambientais, limpeza e processos , entre outros , as águas contaminadas são muito diversificadas. Os 5 exemplos para este grupo são os seguintes:

Exemplo 1: Resíduo resultante da limpeza de caixas separadoras. (**BORRA OLEOSA**)

Exemplo 2: Água com tintas e solventes (**SOLVENTES**).

Exemplo 3: Água contaminada com cola (**COLA**).

Exemplo 4: Água de processo de produção de tintas e vernizes (**TINTA**).

Exemplo 5: Efluentes de acidente rodoviário (**ÓLEO**).

QUADRO 13 - ANÁLISES LABORATORIAIS DE ÁGUAS CONTAMINADAS

Parâmetros		Unidade	BORRA OLEOSA	SOLVENTE	COLA	TINTA	ÓLEO	LQ	DE - NRW	
									Médio	Máximo
<b>Antimônio</b>	Sb	mg/kg	<58,90	< 58,90	<58,90	<58,90	<58,90	58,90	50	120
<b>Arsênio</b>	As	mg/kg	<1,00	< 1,00	<1,00	<1,00	<1,00	1,00	5	13
<b>Cádmio</b>	Cd	mg/kg	<2,10	< 2,10	<2,10	<2,10	<2,10	2,10	4	9
<b>Chumbo</b>	Pb	mg/kg	<24,40	<b>109,90</b>	<24,40	<24,40	<24,40	24,40	70- 190	200-400
<b>Cloreto</b>	Cl	mg/kg	< 50,00	98,743	87,01	121,30	55,98	50,00	-	-
<b>Cobalto</b>	Co	mg/kg	<20,30	< 20,30	<20,30	<20,30	<20,30	20,30	6	12
<b>Cromo Total</b>	Cr	mg/kg	<27,20	< 27,20	<27,20	<27,20	<27,20	27,20	40-125	120-250
<b>Enxofre</b>	S	%	0,7426	2,277	0,85	0,88	0,47	-	-	-
<b>Estanho</b>	Sn	mg/kg	<95,00	< 95,00	<95,00	<95,00	<95,00	95,00	30	70
<b>Mercúrio</b>	Hg	mg/kg	< 0,05	< 0,05	0,1	<0,05	<0,05	0,05	0,6	1,2
<b>Níquel</b>	Ni	mg/kg	<15,40	< 15,40	<15,40	<15,40	<15,40	15,40	50	100
<b>PCS</b>		cal/g	<b>1723,90</b>	4262,40	<b>69,80</b>	<b>2181,10</b>	<b>993,40</b>	95,22	3827,8	4784,7
<b>Vanádio</b>	V	mg/kg	<103,20	< 103,20	<103,20	<103,20	<103,20	103,2	10	25
<b>Tálio</b>	Tl	mg/kg	< 58,10	<19.40	<58,10	<58,10	<58,10	58,10	1	2
<b>Cobre Total</b>	Cu	mg/kg	32,26	< 6,60	*	*	*	6,60	123-350	300-700

\* Informação não disponível.

FONTE: O AUTOR (2013)

Nestes 5 exemplos verifica-se a heterogeneidade entre resíduos com descrições similares e o mesmo componente principal. Verifica-se aqui a possibilidade de variações de contaminantes nos resíduos.

Em relação aos metais apenas o SOLVENTE ficou com valor de chumbo acima do valor mínimo possível para prática. Portanto poderia ser usado, mas com acompanhamento das próximas análises para verificar a variação das amostras.

O poder calorífico ficou abaixo em 4 dos 5 resíduos. Apenas o SOLVENTE estaria dentro do permitido. Evidenciando que nestes casos outros tipos de destinações seriam mais indicadas na Alemanha.

Em relação à EURITIS apresentada no capítulo de 2.3, todos os resíduos seriam reprovados pela alta concentração de enxofre, e 4 reprovados pela concentração de cloro.

#### 4.3.2 Lodos Industriais

Resíduos oriundos de lodos de estações de tratamento industrial ou de processos industriais que geram lodos.

Exemplo 1: Lodo de rampa de lavagem ( ÓLEO).

Exemplo 2: Borra oleosa (BORRA OLEOSA).

Exemplo 3: Lodo biológico (BIOLÓGICO).

Exemplo 4: Lodo de estação de tratamento de indústria de tintas (PROCESSO TINTA).

Exemplo 5: Lodo de estação de tratamento de indústria de tintas a base de água. (TINTA ÁGUA).



QUADRO 14 - ANÁLISES LABORATORIAIS DE LODOS INDUSTRIAIS

Parâmetros		Unidade	ÓLEO	BORRA OLEOSA	BIOLÓGICO	PROCESSO TINTA	TINTA ÁGUA	LQ	DE - NRW	
									Médio	Médio
<b>Antimônio</b>	Sb	mg/kg	<58,90	< 58,90	<58,90	<58,90	<58,90	58,9	50	120
<b>Arsênio</b>	As	mg/kg	<1,00	< 1,00	<1,00	<1,00	<1,00	1,00	5	13
<b>Cádmio</b>	Cd	mg/kg	<2,10	< 2,10	<2,10	<2,10	<2,10	2,10	4	9
<b>Chumbo</b>	Pb	mg/kg	38,6	< 24,40	<24,40	<24,40	<24,40	24,40	70-190	200-400
<b>Cloreto</b>	Cl	mg/kg	<50,00	393,53	304,87	1103,85	5754,46	50,00	-	-
<b>Cobalto</b>	Co	mg/kg	<20,30	< 20,30	<20,30	<20,30	<20,30	20,30	6	12
<b>Cromo Total</b>	Cr	mg/kg	36,18	< 27,20	<27,20	<27,20	<27,20	27,20	40-125	120-250
<b>Enxofre</b>	S	%	<0,2101	0,6	0,53	1,05	0,32	-	-	-
<b>Estanho</b>	Sn	mg/kg	<b>353,20</b>	< 95,00	<95,00	<95,00	<95,00	95,00	30	70
<b>Mercúrio</b>	Hg	mg/kg	0,14	< 0,05	<b>0,95</b>	0,09	< 0,05	0,05	0,6	1,2
<b>Níquel</b>	Ni	mg/kg	<15,40	< 15,40	<15,40	<15,40	<15,40	15,40	50	100
<b>PCS</b>		cal/g	<b>805,80</b>	<b>781,00</b>	<b>179,60</b>	<b>339,40</b>	<b>2036,60</b>	95,22	3827,8	4784,7
<b>Vanádio</b>	V	mg/kg	<103,20	< 103,20	<103,20	<103,20	<103,20	103,20	10	25
<b>Tálio</b>	Tl	mg/kg	< 58,10	<58,10	<58,10	<58,10	<58,10	58,10	1	2
<b>Cobre Total</b>	Cu	mg/kg	87,00	12,87	*	*	*	6,60	123-350	300-700

\* Informação não disponível.

FONTE: O AUTOR (2013)

Em relação aos metais, apenas o ÓLEO ficou com o Estanho bem acima do limite. O BIOLÓGICO ficou acima do valor de prática para o Mercúrio, portanto poderia ser usado, mas com acompanhamento das próximas análises para verificar a variação das amostras. O resíduo TINTA ÁGUA ficou com o Telúrio duvidoso, portanto teria que ser realizada nova análise para este parâmetro com limite de quantificação menor.

O poder calorífico ficou abaixo em todos os 5 lodos, sendo reprovados neste parâmetro. Pelos laudos serem do Paraná, mesmo com o poder calorífico abaixo do limite estadual, podem ser utilizados para destruição térmica ou substituição de matéria-prima. Para o uso na Alemanha também poderia ser verificada a possibilidade de uso como matéria-prima. Caso contrário seria necessária uma maior secagem dos lodos para aumento do poder calorífico, uma vez que atenderam os limites restantes.

Em relação à EURITIS apresentada no capítulo de 2.3 apenas o ÓLEO estaria dentro dos padrões no Cloro e Enxofre.

#### 4.3.3 Solventes e Borras de Tintas

Resíduos de indústria metal mecânica, gráficas, manutenções e origens diversas.

Exemplo 1: Borra de tinta de indústria gráfica (BORRA).

Exemplo 2: Solventes e produtos químicos da indústria gráfica (GRÁFICA).

Exemplo 3: Borra de tinta de pintura automotiva (AUTOMOTIVA).

Exemplo 4: Solventes (SOLVENTE).

Exemplo 5: Borra de tinta de processos de recuperação de tintas. (RECUPERAÇÃO).

QUADRO 15 – ANÁLISES LABORATORIAIS DE SOLVENTES E BORRAS DE TINTA

Parâmetros		Unidade	BORRA	GRÁFICA	AUTOMOTIVA	SOLVENTE	RECUPERAÇÃO	LQ	DE - NRW	
									Médio	Médio
<b>Antimônio</b>	Sb	mg/kg	< 58,90	<58,90	<58,90	<b>59,3</b>	<58,90	58,90	50	120
<b>Arsênio</b>	As	mg/kg	<1,00	<1,00	<1,00	< 1,00	<1,00	1,00	5	13
<b>Cádmio</b>	Cd	mg/kg	2,55	2,77	<2,10	< 2,10	3,78	2,10	4	9
<b>Chumbo</b>	Pb	mg/kg	< 24,40	<24,40	<b>685,70</b>	24,57	2106	24,40	70-190	200-400
<b>Cloreto</b>	Cl	mg/kg	6321,41	1772,86	<50,00	134,81	186,87	50,00	-	-
<b>Cobalto</b>	Co	mg/kg	<20,30	<20,30	<b>80,67</b>	<b>20,44</b>	<20,30	20,30	6	12
<b>Cromo Total</b>	Cr	mg/kg	<27,20	<27,20	<b>146,90</b>	27,39	432,20	27,20	40-125	120-250
<b>Enxofre</b>	S	%	0,6598	0,0328	<0.12	0,7576	0,44	-	-	-
<b>Estanho</b>	Sn	mg/kg	<95,00	<b>510,8</b>	<95,00	95,65	<95,00	95	30	70
<b>Mercúrio</b>	Hg	mg/kg	0,12	0,1	0,16	< 0,05	0,3	0,05	0,6	1,2
<b>Níquel</b>	Ni	mg/kg	<15,40	<15,40	38,47	15,51	<15,40	15,4	50	100
<b>PCS</b>		cal/g	<b>818,7</b>	<b>1769,9</b>	<b>3773,40</b>	9394,2	<b>3077,6</b>	95,22	3827,8	4784,7
<b>Vanádio</b>	V	mg/kg	<103,20	<103,20	<103,20	103,91	<103,20	103,2	10	25
<b>Tálio</b>	Tl	mg/kg	< 58,10	< 58,10	<19,40	<58,10	<58,10	58,10	1	2
<b>Cobre Total</b>	Cu	mg/kg	115	< 6,60	< 6,60	*	*	-	123-350**	300-700**

\* Informação não disponível.

FONTE: O AUTOR (2013)

Em relação aos metais o SOLVENTE foi reprovado pelo Antimônio e Cobalto. O AUTOMOTIVA pelo Chumbo, Cobalto e Cromo, e ambos ultrapassaram os limites no Antimônio (Sb). O AUTOMOTIVA ainda excedeu no Chumbo, Cromo no Cobalto.

O poder calorífico ficou abaixo em 4 dos 5 solventes, sendo reprovados neste parâmetro. Porém, a literatura descreve os solventes como resíduos de alto poder calorífico (VANDECASTEELE, 2001). O SOLVENTE apesar de possuir bom poder calorífico, ficou acima no Cobalto.

Em relação à EURITIS apresentada no capítulo de 2.3 todos estão com o limite de cloro acima.

Neste caso verificamos a incompatibilidade com o coprocessamento, apesar de ser um resíduo historicamente com potencial. As amostras escolhidas não atenderam em algum dos parâmetros. O reprocesso, tratamento ou a incineração seriam então algumas opções para estes resíduos.

#### 4.3.4 Sólidos sem Contaminação

Resíduos não recicláveis diversos.

Exemplo 1: Sólidos diversos, embalagens plásticas para destruição, uniformes, etiquetas, borrachas, etc.

Exemplo 2: Rejeito do processo de reciclagem de papel.

Exemplo 3: Produtos esportivos e têxteis .

Exemplo 4: Equipamentos de proteção individual.

Exemplo 5: Sólidos diversos não recicláveis.

QUADRO 16 – ANÁLISES LABORATORIAIS DE SÓLIDOS NÃO RECICLÁVEIS

Parâmetros		Unidade	Ex.1	Ex.2	Ex.3	Ex.4	Ex.5	LQ	DE - NRW	
									Médio	Médio
<b>Antimônio</b>	Sb	mg/kg	23,27	<58,90	<58,90	<58,90	*	58,90	50	120
<b>Arsênio</b>	As	mg/kg	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	< 1,00	1,00	5	13
<b>Cádmio</b>	Cd	mg/kg	2,80	<2,10	2,91	<2,10	< 0,70	2,10	4	9
<b>Chumbo</b>	Pb	mg/kg	62,51	<24,40	<24,40	<24,40	<b>258,2</b>	24,40	70-190	200-400
<b>Cloreto</b>	Cl	mg/kg	679,02	< 50,00	124,25	92,15	< 50,00	50,00	-	-
<b>Cobalto</b>	Co	mg/kg	<6,80	<20,30	<20,30	<20,30	< 6,80	20,30	6	12
<b>Cromo Total</b>	Cr	mg/kg	<b>1495</b>	<27,20	<27,50	<27,20	44,1	27,20	40-125	120-250
<b>Enxofre</b>	S	%	0,63	0,99	0,24	1,00	0,45	-	-	-
<b>Estanho</b>	Sn	mg/kg	<32,00	<95,00	<95,00	<95,00	<b>163,8</b>	95,00	30	70
<b>Mercúrio</b>	Hg	mg/kg	0,06	<b>1,54</b>	0,07	0,38	< 0,05	0,05	0,6	1,2
<b>Níquel</b>	Ni	mg/kg	<5,10	<15,40	<15,40	<15,40	< 5,10	15,40	50	100
<b>PCS</b>		cal/g	<b>3468,60</b>	<b>3729,10</b>	5358,20	5574,10	4781,40	95,22	3827,8	4784,7
<b>Vanádio</b>	V	mg/kg	<34,40	<103,20	<103,20	<103,20	< 34,40	103,20	10	25
<b>Tálio</b>	Tl	mg/kg	< 19,40	< 58,10	<58,10	<58,10	<58,10	58,10	1	2
<b>Cobre</b>	Cu	mg/kg	*	*	*	*	13,21	2,20	123-350	300-700

\* Informação não disponível.

FONTE: O AUTOR (2013)

Em relação aos metais, 3 amostras foram reprovadas. O Ex 1. de resíduos não contaminados em geral ficou acima no Cromo, o Ex 2. ficou acima no Mercúrio e o Ex. 5 no Chumbo e no Estanho.

O poder calorífico ficou abaixo em apenas 2 das 5 amostras, porém com os valores próximos dos níveis mínimos aceitáveis para resíduos de origem domiciliar.

Em relação à EURITIS apresentada no capítulo de 2.3 os Ex. 1. 3. e 4. ficaram acima do limite no cloro.

Neste caso verifica-se a necessidade de mais análises, por ser um material muito heterogêneo. O poder calorífico ficou próximo ao aceitável e os metais podem variar conforme a amostragem.

#### 4.3.5 Sólidos Contaminados

Materiais diversos contaminados com resíduos como óleo, graxas, solventes e tintas.

Exemplo 1: Equipamentos de proteção individual contaminados com óleo.

Exemplo 2: Sólidos diversos contaminados.

Exemplo 3: Equipamentos de proteção individual, restos de tecido, couro e lixa.

Exemplo 4: Sólidos diversos contaminados de manutenção industrial.

Exemplo 5: Resíduos da fabricação de embalagens e filmes coextrusados. Composto por chapas de fotopolímero, espumas, refil de adesivo, filtro de lã e de carvão, fotolito, pó de serra, pó de borracha, raspa de limpeza de peças, EPI's usados contaminados com solventes e de tinta a base de solventes.

QUADRO 17 - ANÁLISES LABORATORIAIS DE SÓLIDOS CONTAMINADOS

Parâmetros		Unidade	Ex 1	Ex 2	Ex 3	Ex 4	Ex 5	LQ	DE - NRW	
									Médio	Médio
<b>Antimônio</b>	<i>Sb</i>	<i>mg/kg</i>	<58,90	<b>395,45</b>	21,25	< 58,90	<58,90	58,90	50	120
<b>Arsênio</b>	<i>As</i>	<i>mg/kg</i>	<1,00	< 1,00	1,81	< 1,00	<1,00	1,00	5	13
<b>Cádmio</b>	<i>Cd</i>	<i>mg/kg</i>	<2,10	<b>188,48</b>	<2,10	< 2,10	<2,10	2,10	4	9
<b>Chumbo</b>	<i>Pb</i>	<i>mg/kg</i>	<b>4661,00</b>	<b>346,2</b>	97,58	<b>1972</b>	<24,40	24,40	70-190	200-400
<b>Cloreto</b>	<i>Cl</i>	<i>mg/kg</i>	241,60	< 50,00	790,45	60,793	< 50,00	50,00	-	-
<b>Cobalto</b>	<i>Co</i>	<i>mg/kg</i>	<20,30	<b>20,62</b>	<20,30	< 20,30	<20,30	20,30	6	12
<b>Cromo Total</b>	<i>Cr</i>	<i>mg/kg</i>	<b>684,50</b>	27,62	<27,20	<b>439</b>	<27,20	27,20	40-125	120-250
<b>Enxofre</b>	<i>S</i>	%	0,29	0,067	0,2273	0,0354	0,329	-	-	-
<b>Estanho</b>	<i>Sn</i>	<i>mg/kg</i>	<b>690.60</b>	<b>96,48</b>	<95,00	<b>446,7</b>	<95,00	95,00	30	70
<b>Mercúrio</b>	<i>Hg</i>	<i>mg/kg</i>	0,16	< 0,05	<0,05	0,335	0,09	0,05	0,6	1,2
<b>Níquel</b>	<i>Ni</i>	<i>mg/kg</i>	<15,40	15,64	<15,40	< 15,4	<15,40	15,40	50	100
<b>PCS</b>		<i>cal/g</i>	<b>3219,60</b>	4674,4	6287,9	<b>1329,6</b>	5725,2	95,20	3827,8	4784,7
<b>Vanádio</b>	<i>V</i>	<i>mg/kg</i>	<103,20	<b>104,8</b>	<103,20	< 103,20	<103,20	103,00	10	25
<b>Tálio</b>	<i>Tl</i>	<i>mg/kg</i>	< 58,10	< 58,10	<58,10	<58,10	<58,10	58,10	1	2
<b>Cobre Total</b>	<i>Cu</i>	<i>mg/kg</i>	81,94	*	7,49	70,51	10,61	6,60	123-350	300-700

\* Informação não disponível.

FONTE: O AUTOR (2013)

Neste tipo de resíduos se espera contaminação. Apesar disso os Ex.3 e 5 ficaram dentro dos limites. Porém, o Ex. 2 foi o resíduo com maior número de parâmetros fora, Antimônio, Cádmio, Chumbo, Cobalto, Estanho e Vanádio. O Ex 1. apresentou uma altíssima concentração de Chumbo, Cromo e Estanho acima dos limites.

O poder calorífico ficou abaixo em apenas 2 das 5 amostras, Ex 1. e 4, que também foram reprovadas nos metais.

Em relação à EURITIS os Ex. 1. 3. e 4. ficaram acima do limite no cloro.



## 5. CONCLUSÃO

### **Processo**

Os processos operacionais do coprocessamento são parecidos nos dois países. O Brasil tem fábricas com tecnologias de produção das mais avançadas e produz mais que o dobro de cimento que a Alemanha. Porém, coprocessa 37,9% do volume do país europeu.

Observou-se também a diferença dos tipos resíduos coprocessados. Como exemplo, na Alemanha 11% do resíduo coprocessado tem origem domiciliar enquanto no Brasil apenas existem projetos pilotos para este resíduo. Evidenciando um potencial grande não apenas de volume mas também no aumento de tipos de resíduos para coprocessamento no Brasil.

O controle ambiental é de qualidade inferior no Brasil, entretanto condizente a realidade e suficiente para o cumprimento da legislação.

O processo de preparação e alimentação de resíduos é que, por vezes, se diferencia nos dois países, sendo mais avançado na Alemanha. As etapas de mistura, carga e descarga no país europeu são, em sua maioria, automatizadas diminuindo o risco de acidentes e melhorando a produtividade.

### **Legislação**

Nos dois países verifica-se um maior número de regulamentações para controle de emissões atmosféricas do que para o controle de quais tipos de resíduos serão utilizados. Na Alemanha há apenas algumas diretrizes ou normas com limites para a regulamentação de resíduos para coprocessamento, porém a exigência de monitoramento e controle de caracterização dos resíduos é mais rigorosa. O que evidencia o fato do modelo alemão ser concentrado no licenciamento de resíduos para coprocessamento que estabelece estes procedimentos. É por meio do teste de queima que ocorre a definição dos parâmetros de alimentação do forno conforme a capacidade técnica/operacional de cada fábrica. Também este teste indica a importância do controle das emissões atmosféricas e é onde devem ser concentradas as atenções.

Apesar de poucos parâmetros serem encontrados na legislação alemã para uso de resíduos para coprocessamento, os valores limites para metais chegam a ser

muito mais restritivos que os limites adotados pela legislação brasileira. A grande diferença entre os limites das legislações aponta uma necessidade de mais estudos na questão do impacto de metais na qualidade, saúde e meio ambiente. A grande variação de limites demonstra a incerteza dos valores definidos como limites, evidenciando a necessidade de pesquisa para cada tipo de substância controlada e usada no processo de coprocessamento.

O modelo alemão passa a responsabilidade de controle de qualidade e monitoramento ambiental dos resíduos utilizados no coprocessamento para a indústria cimenteira e não para o gerador do resíduo, facilitando a destinação para esta tecnologia. Ao concentrar o controle ambiental na emissão e no licenciamento das fábricas, os riscos são monitorados mais facilmente, pois estão centralizados na fábrica. O controle obrigatório de qualidade da entrada do resíduo aumenta a garantia de que resíduos indesejados não sejam coprocessados pois estão fora dos parâmetros licenciados. Outro fator positivo é a utilização da lista de resíduos do órgão ambiental, que facilita o processo de licenciamento, pois as características já são conhecidas.

Para o monitoramento dos resíduos e das emissões atmosféricas a legislação alemã estabelece limites médios e limites máximos, o que na prática de uso de resíduos é muito coerente. A heterogeneidade dos resíduos potencializa uma variação na composição dos resíduos e nas emissões atmosféricas. Um valor médio diário, por exemplo, representa de forma mais real as emissões, pois estão consideradas as variações.

Foi evidenciada a falta de base teórica científica para estabelecimento de limites de alguns metais nas emissões nos dois países. Metais diferentes e limites diferentes para os mesmos parâmetros são exigidos pelas várias legislações. Foram verificados limites para 10 somatórios de grupos diferentes de metais em 9 regulamentações apresentadas, evidenciando que não existe uma coerência entre os órgãos regulamentadores para estabelecer os tipos de metais destes grupos.

### **Aplicação Para Resíduos Brasileiros**

Das amostras analisadas para o coprocessamento no Brasil, apenas 20% possuíam características para o coprocessamento na Alemanha. Este valor subiria se os lodos pudessem ser utilizados como matéria-prima de substituição, chegando então a 40%. Salienta-se que das amostras comparadas todas foram aprovadas para uso no estado do Paraná.

A diferença dos padrões de qualidade do modelo alemão para o brasileiro para aceite de resíduo são verificadas no número de reprovações. Além da diferença dos limites para metais, o poder calorífico dos resíduos para coprocessamento aceitável no Brasil é menor do que na Alemanha, permitindo que mais tipos de resíduos possam ser destinados como combustíveis de substituição nesta tecnologia.

Nesta pesquisa foram evidenciadas grandes diferenças entre o coprocessamento no Brasil e na Alemanha. Tecnicamente o Brasil se equipara à Alemanha nos processos de fabricação de cimento, porém os dados proporcionais de volume coprocessado ficam muito abaixo do país germânico mesmo sendo o Brasil menos restritivo. A diferença de tipos de resíduos coprocessados nos dois países evidenciou um potencial de crescimento não apenas no volume mas em tipos de resíduo para destino nas fábricas de cimento no Brasil. A maior diferença porém está na legislação, mais permissiva no Brasil em todos os aspectos, evidenciado pelas grandes diferenças nos valores de limites da legislação. Há a necessidade de uma reflexão quanto aos parâmetros e seus limites adotados, e quanto ao sistema de atuação dos órgãos ambientais, de licenciamento, monitoramento e fiscalização das atividades do coprocessamento.

## REFERÊNCIAS

ABCP Associação Brasileira de Cimento Portland. **Contribuição efetiva da indústria do cimento para a sustentabilidade, 2013** Disponível em: [www.abcp.org.br](http://www.abcp.org.br)

ABCP(b) Associação Brasileira de Cimento Portland. **Estatísticas**. São Paulo, 2013 Disponível em: <http://coprocessamento.org.br/estatisticas>

ABELHA P. **Emissões Gasosas Durante A Co-Combustão De Carvão Com Resíduos**. Universidade nova de Lisboa, Lisboa, 2005

ANÁLISE EDITORIAL. **Anuário análise gestão ambiental**. São Paulo 2007 Disponível em: [www.analise.com](http://www.analise.com)

BATTAGIN A. **Uma breve história do cimento Portland**. ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. Folheto coprocessamento 2009. Disponível em: [www.abcp.org.br](http://www.abcp.org.br)

ACHTERNBOSCH M., BRÄUTIGAM K. -R. **Herstellung Zementklinker Verfahrensbeschreibung und Analysen zum einsatz von Sekundärbrennstoffen**. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 2000.

BOGNER, J., M. ABDELRAFIE AHMED, C. DIAZ, A. FAAL, Q. GAO, S. HASHIMOTO, K. MARECKOVA, R. PIPATTI, T. ZHANG. **Waste Management In Climate Change Cambridge**. United Kingdom and New York, NY, USA 2007.

BRANCO F. C. **Press release**. Rio de Janeiro, janeiro de 2009. Disponível em: [www.lafarge.com.br](http://www.lafarge.com.br)

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Lei Federal nº 12.305., Brasília, 2 de Agosto de 2010.

BRASIL. **Resíduos Sólidos – Classificação** NBR 10004, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL. **Plano Nacional de Energia 2030**. Empresa de Pesquisa Energética - EPE e Ministério de Minas e Energia - MME, Brasília 2007. Disponível em: [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)

CARVALHO, V.O. SILVA, R.J. MENON, G.J. **Possibilidade de Co-processamento de resíduos em fornos rotativos de fábricas de cimento**, IV Congresso Brasileiro de Cimento, São Paulo, 1996

CE - Comunidade Europeia, Directiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro de 2008, **Relativa a resíduos e que revoga certas diretivas**. Disponível em <http://eur-lex.europa.eu>

CE - Comunidade Européia. Directiva 1999/31/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 26 de Abril de 1999, **Relativa à disposição de resíduos em aterros** - Disponível em <http://eur-lex.europa.eu>

CEMA. Conselho Estadual Do Meio Ambiente. **Estabelece a exigência e os critérios na solicitação e emissão de Autorizações Ambientais para coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, com fins de substituição de matéria prima ou aproveitamento energético.** Resolução 76. Curitiba, 2009.

CEMBUREAU The European Cement Association. **Activity Report 2012.** Brussels 2012. Disponível em: [www.cembureau.eu](http://www.cembureau.eu)

CERQUEIRA E ALVES, 1999 e SANCHES, 2000 apud, Menezes, A. .A, Gerlach J. L. e Menezes M. M. **Estágio Atual Da Incineração No Brasil.** ABLP –Associação Brasileira de Limpeza Pública VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, Curitiba, Abril de 2000

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - **Procedimento para utilização de resíduos em fornos de produção de clínquer**– P4. 263/03 São Paulo dezembro de 2003.

CNI/ABCP. Confederação Nacional da Indústria. Associação Brasileira de Cimento Portland. **Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento**– Brasília, 2012. 58 p. (Cadernos setoriais Rio+20)

CONAMA. Conselho Nacional Do Meio Ambiente, **Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos**, Resolução 264, 1999.

CONAMA. Conselho Nacional Do Meio Ambiente. **Procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos.** Resolução 316, 2002.

CONSEMA. Conselho Estadual Do Meio Ambiente. **Licenciamento ambiental para co-processamento de resíduos em fornos de clínquer.** Resolução 002. Porto Alegre 2000.

COP 10. Conference of the Parties. **Reporting Service for Environment and Development Negotiations.** Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal, Vol. 20 No. 37 pg. 7, Cartagena, Colombia 2011. Disponível em <http://www.iisd.ca/basel/cop10/>

COPAM, **Conselho Estadual De Política Ambiental Conselho Estadual De Política Ambiental.** Deliberação Normativa 154/2010. Belo Horizonte. Agosto de 2010. Disponível em: [www.siam.mg.gov.br](http://www.siam.mg.gov.br)

DALBON F. **Coprocessamento, Solução Ambiental Para Resíduos.** ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, julho de 2011, Palestra técnica disponível em: [www.firjan.org.br](http://www.firjan.org.br)

DEL BEL, D E SALGOSA A. **A Importância Da Infraestrutura De Destinação De Resíduos Sólidos**. Política Nacional de Resíduos Sólidos acelera oportunidades de mercado. Revista Saneas Ano XII Nr. 43 Out/Nov/Dez/Jan 2012

DEN 06/08, **Série Recursos Energéticos Avaliação Preliminar Do Aproveitamento Energético Dos Resíduos Sólidos Urbanos De Campo Grande**, MS Ministério de Minas e Energia Rio de janeiro, 2008. Disponível em: [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)

EPE - Empresa de Pesquisa Energética, **Balanço Energético Nacional 2012: Ano base 201** – Rio de Janeiro, 2012 Disponível em: <http://www.mme.gov.br>

EURITIS – European Union for Responsible Incineration and Treatment of Special Waste. - Disponível em: <http://www.incineration.info/home>

FARENZENA, H.**Clinquer**, Junho de 2011. Disponível em <http://blogdocumento.blogspot.com.br>

PAES FILHO F., DE SOUZA J., CARVALHOR., **Avaliação econômica financeira da utilização dos resíduos de biomassa considerando a logística para aproveitamento em fornos e fornalhas de uma cerâmica vermelha em Arapiraca** – AL, Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação,.Palmas Tocantins 2012

FLSMIDTH A/S, **Highlights – Cement & Minerals**, Copenhagen, Denmark, Nov. 2008 Disponível em: [www.flsmidth.com](http://www.flsmidth.com)

GALLENKEMPERB., WIEMER K., FLAMME S., **Stand und Perspektiven der Gütesicherung von Sekundärbrennstoffen durch die Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e. V.** , Brandenburgische Umwelt Berichte 6 S. 172-177, 2000

FORMOSINHO S., PIO C., CAVALHEIRO J. H. B. J. R. - **Parecer Relativo Ao Tratamento De Resíduos Industriais Perigosos**, Aveiro, Maio de 2000

FISCHER K., – **Tratamento Térmico – Gerenciamento e Tratamento de Resíduos**, Disciplina do Mestrado Profissionalizante em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Universidade Federal do Paraná, Curitiba 2012 Notas de aula.

GENDEBIEN A., LEAVENS A., BLACKMORE K., GODLEY A., LEWIN K., WHITING K.J. AND DAVIS R., GIEGRICH J., FEHRENBACH H. AND GROMKE U., DEL BUFALO N., HOGG D.- **Refuse Derived Fuel, Current Practice And Perspectives** - European Commission. Swindon, Inglaterra, julho 2003

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Pesquisa nacional de saneamento básico**, 2008.

HIMENVIRO, Intensiv FilterHimenviro GmbH - **Entstaubungsprozess** – Disponível em <http://www.intensiv-filter.com/geschaeftsfelder/zement-kalk-gips/>

KARSTENSEN, Kåre Helge -**Formação e Emissão de POPs pela Indústria de Cimento**. SINTEF – Fundação para a Pesquisa Científica e Industrial da Noruega para World Business Council for Sustainable Development - Cement Sustainability Initiative, Rima Editora, São Paulo, Janeiro de 2006.

KHD Humboldt Wedag International Koln, 2013 Disponível em: <http://www.khd.com/bypass-systems.html>

Kreislaufwirtschaft Abfall nutzen – **Ressourcen schonen, Naturschutz und Reaktorsicherheit**, Bundesministerium Für Umwelt, Berlin, 2011.

LIEBL e GERBER, 1996 – *apud* Siqueira, Ligia Cristina Gonçalves de –**Avaliação do impacto das emissões de metais gerados no coprocessamento de resíduos em fábricas de cimento** – USP Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MARINGOLO, V. **Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para a sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento**, Universidade de São Paulo, 2001 Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses>

MATIAS D., PEDROSO L. **Indústria Cimenteira** - Química e Indústria. Disponível em: <http://www.geocities.ws/dmatias/trabalhos/cimento>

METZ B., DAVIDSON O.R., BOSCH P.R., DAVE R., MEYER L.A. **Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

MILANEZ, BRUNO; FERNANDES, LÚCIA DE OLIVEIRA AND PORTO, MARCELO FIRPO DE SOUZA. **A coincineração de resíduos em fornos de cimento: riscos para a saúde e o meio ambiente**. *Ciênc. saúde coletiva* [online]. 2009, vol.14, n.6, pp. 2143-2152. ISSN 1413-8123

NRW UMWELT- Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen -**Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zement-, Kalk- und Kraftwerken in Nordrhein-Westfalen** - 2. Auflage Düsseldorf, September 2005

DEN 06/08, **Série Recursos Energéticos Avaliação Preliminar Do Aproveitamento Energético Dos Resíduos Sólidos Urbanos De Campo Grande**, MS Ministério de Minas e Energia Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br) Acessado em 05/02/2013

PETERS, E. – **Direito e Meio Ambiente**, Disciplina do Mestrado Profissionalizante em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Universidade Federal do Paraná, Curitiba 2012 Notas de aula.

RAL. Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. - RAL-GZ724 - **Gütezeichen Güte- und Prüfbestimmungen für Sekundärbrennstoffe**, Bundesgütegemeinschaft für Sekundärbrennstoffe e.V., Sankt Augustin Juni 2001

RCM, Resolução do Conselho de Ministros, **Resolução n.º 92/2000 (RCM 92/2000)**, de 20 de Julho de 2000. Disponível em: [www.estg.ipg.pt/legislacao\\_ambiente](http://www.estg.ipg.pt/legislacao_ambiente)

RIBEIRO J. C. J.- **O modelo descentralizado da gestão ambiental na Alemanha - reflexões para a realidade em Minas Gerais** - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES – 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental- Foz do Iguaçu, set. 1997

ROCHA, SÔNIA DENISE FERREIRA; LINS, VANESSA DE FREITAS CUNHA AND SANTO, BELINAZIR COSTA DO ESPÍRITO. **Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer.** *Eng. Sanit. Ambient.* [online]. vol.16, n.1, pp. 1-10. ISSN 1413-4152, 2011

ROSSIN C., HIRATA L. , TEIXEIRA T., CAVASIN E. **Estudo sobre o setor de tratamento de resíduos industriais** PricewaterhouseCoopers e Associação Brasileira de Tratamento de Resíduos (ABETRE), Março de 2006

SEMA, Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, **Resolução 054**, Curitiba, Paraná, 22 de Dezembro de 2006.

SIQUEIRA, L. C. G. DE –**Avaliação do impacto das emissões de metais gerados no coprocessamento de resíduos em fábricas de cimento** – USP Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SMITH, A., BROWN, K., OGILVIE, S., RUSHTON, K, BATES, J., **Waste Management Options And Climate Change**, 2001.

SANTI AMM. **Coincinação e coprocessamento de resíduos industriais perigosos em fornos de clínquer.** Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2003

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **História do Cimento no Brasil.** Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: [http://www.snic.org.br/pdf/Historia\\_do\\_Cimento\\_no\\_Brasil.pdf](http://www.snic.org.br/pdf/Historia_do_Cimento_no_Brasil.pdf)

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Relatório Anual 2011** Rio de Janeiro, 2012 <http://www.snic.org.br/>

TA SIEDLUNGSABFALL - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit- **Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen** - Bundesrepublik Deutschland- 14. Mai 1993.

UBA-UMWELTBUNDESAMT. **Stellenwert Der Abfallverbrennung In Deutschland**, Dessau, 2008.

UBA-UMWELTBUNDESAMT. **Merkblatt über die Besten Verfügbaren Techniken in der Zement-, Kalk- und Magnesiumoxidindustrie** , Dessau, Mai 2010  
Disponível em: <http://www.bvt.umweltbundesamt.de/kurzue.htm>



UBA-UMWELTBUNDESAMT. **Einsatz von Sekundärbrennstoffen**, Dessau, Mai 2006

VDZ - Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Hrsg.) – **Zement Taschenbuch**, Düsseldorf 2002. Em parte disponível em: <http://www.vdz-online.de/publikationen-branchendaten/zement-taschenbuch/>

VDZ - Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Hrsg.) – **Umweltverträglichkeit von Zement und Beton. Herstellung, Anwendung und Sekundärstoffeinsatz. Die deutsche Zementindustrie informiert**. Düsseldorf 1996. Disponível em: <http://www.vdz-online.de>

VDZ - Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Hrsg.) - **Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2011**, Düsseldorf Agosto de 2012. Disponível em: <http://www.vdz-online.de>

VDZ- Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Hrsg.) - **Tätigkeitsbericht 2009-2012** Düsseldorf, setembro de 2012. Disponível em: <http://www.vdz-online.de>

VDZ - Verein Deutscher Zementwerke e. V. **Naturschutz und Zementindustrie**, Düsseldorf, 2013 Disponível em: (Hrsg.) - <http://www.vdz-online.de/zementherstellung/rohstoffe/naturschutz-und-ressourcenschonung>

VANDECASTEELE C., VERMEULEN I. **Environmental impact of incineration of calorific industrial waste in a rotary kiln and in a cement kiln**. A comparison. Department of Chemical Engineering, University of Leuven, Belgium May 2011

VOTORANTIM, **Coprocessamento**, 2013 Disponível em: [www.vcimentos.com.br](http://www.vcimentos.com.br)

## **ANEXOS**

ANEXO 1 – Métodos de ensaio.....	125
ANEXO 2 – Exemplo de Laudo Analítico.....	126

## ANEXO 1 – MÉTODOS DE ENSAIO

Os métodos utilizados pelo laboratório para os parâmetros apresentados no capítulo 4.2 seguem abaixo:

<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>
Antimônio	EPA 7040 - Absorção Atômica
Arsênio	EPA 7062 - Gerador de Hidretos / AA
Cádmio	EPA 7130 - Absorção Atômica
Chumbo	EPA 7420 - Absorção Atômica
Cloreto	SM 4500 Cl- - B – Argentometria
Cobalto	EPA 7200 - Absorção Atômica
Cromo Total	US EPA 7190 - Absorção Atômica
Enxofre	Determinação de Enxofre Analisador de En
Estanho	US EPA 7870 - Absorção Atômica
Mercúrio	US EPA 7470 A, 7471 A e 7472 - GH / AA
Níquel	US EPA 7520 - Absorção Atômica
PCS	NBR 11956 - Coque - Determinação do PCS
Tálio	US EPA 7840 - Absorção Atômica
Vanádio	US EPA 7910 - Absorção Atômica
Zinco	US EPA 7950 - Absorção Atômica
Telúrio	SMWW 3120 B - ICP/OES
Óxidos	SMWW 3120 B, USEPA 6010 – ICP

## ANEXO II – EXEMPLO DE LAUDO ANALÍTICO

Exemplo de laudo analítico utilizado, com as informações não autorizadas apagadas:

---

### LAUDO ANALÍTICO

#### 1. INFORMAÇÕES GERAIS

Gerador:  
Endereço: I  
Cidade: Curitiba  
Estado: PR  
Material: Lodo da Rampa de Lavagem  
Nº Laudo: 150000015950

#### 2. OBJETIVO

O presente laudo tem por objetivo realizar análises para verificação de:

- Viabilização para Co-processamento – Resolução CEMA 076/2009

#### 3. ESTUDO DO RESÍDUO

Origem: Lodo oriundo da rampa de lavagem

Data da Amostragem: 30/09/2011

Hora da Amostragem: 14h15min

Técnico Amostrador: .

Plano de Amostragem de responsabilidade do interessado

O Laboratório da                      realiza as amostragens conforme procedimento operacional, o qual é baseado nas seguintes normas:

- Amostragem de resíduos sólidos e líquidos - ABNT NBR 10007:2004;
- Amostragem de efluentes líquidos e Corpos Receptores - ABNT NBR 9898:1997;
- Amostragem de águas subterrâneas - ABNT NBR 15847:2010.

## 4. RESULTADOS ANALÍTICOS

Análise de Massa				
Parâmetros	Unidade	Resultados	LQ	CEMA 76/2009
Umidade	%	11,30	-	-
Umidade	mg/kg	113000,00	-	-
Alumínio	mg/kg	6709,00	71,40	-
Alumínio	%	0,67090	0,00714	-
Antimônio	mg/kg	<58,90	58,90	-
Antimônio	%	<0,00589	0,00589	-
Arsênio	mg/kg	<1,00	1,00	-
Arsênio	%	<0,00010	0,00010	-
Bário	mg/kg	<50,00	50,00	-
Bário	%	<0,0050	0,0050	-
Cádmio	mg/kg	<2,10	2,10	-
Cádmio	%	<0,00021	0,00021	-
Cálcio	mg/kg	15390,00	783,30	-
Cálcio	%	1,539	0,07833	-
Chumbo	mg/kg	38,60	24,40	5000,00
Chumbo	%	0,00386	0,00244	0,50
Cloreto	mg/kg	<50,00	50,00	-
Cloro (como Cl-)	%	<0,005	0,005	-
Cobalto	mg/kg	<20,30	20,30	-
Cobalto	%	<0,00203	0,00203	-
Cromo Total	mg/kg	36,18	27,20	5000,00
Cromo Total	%	0,00362	0,00272	0,50000
Enxofre <sup>(1)</sup>	%	<0,2101	-	-
Enxofre <sup>(1)</sup>	mg/kg	<2101,00	-	-
Estanho	mg/kg	353,20	95,00	-
Estanho	%	0,0353	0,0095	-
Ferro	mg/kg	15760,00	22,80	-
Ferro Total	%	1,576	0,00228	-
Fluoreto <sup>(1)</sup>	mg/kg	7,00	-	-
Fluor (como F-) <sup>(1)</sup>	%	0,0007	-	-
Fósforo	mg/kg	<3,50	3,50	-
Fósforo Total	%	<0,00035	0,00035	-
Mercurio	mg/kg	0,14	0,05	10,00
Mercurio	%	0,000014	0,000005	0,001000
Níquel	mg/kg	<15,40	15,40	-
Níquel	%	<0,00154	0,00154	-
PCS	cal/g	805,80	95,22	-
Potássio	mg/kg	587,20	2,50	-
Potássio	%	0,05872	0,00025	-
Selênio	mg/kg	0,12	0,10	100,00
Selênio	%	0,00001	0,00001	0,01000
Silício	mg/kg	128,90	25,00	-
Silício	%	0,01289	0,00250	-
Tálio	mg/kg	<58,10	58,10	-

Parâmetros	Unidade	Resultados	LQ	CEMA 76/2009
Taio	%	<0,00581	0,00581	-
Vanádio	mg/kg	<103,20	103,20	-
Vanádio	%	<0,01032	0,01032	-
Zinco	mg/kg	188,20	30,20	-
Zinco	%	0,01882	0,00302	-
Telúrio <sup>(1)</sup>	mg/kg	<5,00	-	-
Telúrio <sup>(1)</sup>	%	<0,00050	-	-
Óxido de Alumínio <sup>(1)</sup>	%	1,20	-	-
Óxido de Cálcio <sup>(1)</sup>	%	2,59	-	-
Óxido de Ferro <sup>(1)</sup>	%	3,58	-	-
Óxido de Potássio <sup>(1)</sup>	%	0,073	-	-
Óxido de Magnésio <sup>(1)</sup>	%	1,42	-	-
Óxido de Sódio <sup>(1)</sup>	%	0,02	-	-
Dióxido de Silício <sup>(1)</sup>	%	0,059	-	-
Óxido de Cobre <sup>(1)</sup>	%	0,018	-	-
Óxido de Zinco <sup>(1)</sup>	%	0,029	-	-
Pentóxido de Fósforo <sup>(1)</sup>	%	0,150	-	-
Dióxido de Titânio <sup>(1)</sup>	%	0,065	-	-
Óxido de Lítio <sup>(1)</sup>	%	0,001	-	-
Cobre Total	mg/kg	87,00	6,60	-

LQ → Limite de quantificação

<sup>(1)</sup> → parâmetro analisado em laboratório sub-contratado autorizado pelo SGI -  
conforme procedimento :

Analisado por:

Analista Guimão  
CRQ Região

Analista Guimão  
CRQ Região

Analista Guimão  
CRQ 2ª Região

---

## 5. CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos e comparando com a Legislação CEMA 076/2009 do Estado do Paraná que estabelece critérios para co-processamento de resíduos em fornos de cimento, bem como aprovação da Fábrica de Cimentos mediante verificação dos parâmetros de controle estabelecidos, concluímos que o resíduo "Lodo da Rampa de Lavagem" se aplica como resíduo para co-processamento em fornos de clínquerização, por se enquadrar no Parágrafo Único do artigo 4º da legislação citada acima.

### Observações:

- Período de realização das análises: de 03/10/2011 até 20/10/2011
- Este laudo tem validade de 12 meses a partir da data de emissão.
- Este relatório de ensaio não pode ser reproduzido parcialmente.
- Os resultados analíticos apresentados referem-se somente à amostra analisada pelo laboratório.

Revisado por:

Aprovado por:

---

Analista Químico  
Signatário Autorizado  
CRQ 1111111111 1ª Região

---

Supervisora Laboratório  
Signatário Autorizado  
CRQ 1111111111 1ª Região

Emissão dos Resultados: 27/10/2011

Emissão do Laudo: 27/10/2011



## ANEXO 1 – Métodos de Ensaio Utilizados

As metodologias de quantificação e preparação das amostras aplicadas foram aquela mencionadas na literatura, cujas técnicas analíticas seguem abaixo:

Parâmetro	Método
Umidade	NBR 8293:83 / NBR 5758:2010 / PRO-114-02
Alumínio	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Antimônio	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Arsênio	EPA 7061-A:1992 / PRO-150-07 - AA/GH
Bário	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Cádmio	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Cálcio	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Chumbo	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Cloreto	SMWW 4500 Cl - B:2005 / PRO-115-04 - Arg
Cobalto	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Cromo Total	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Enxofre	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007 - ICP
Estanho	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Ferro Total	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Fluoreto	US EPA 300.1, 9056 / POP PA 057 Rev.00
Fósforo Total	SMWW 4500 P B e D:2005 / PRO-145-01 / UV
Mercurio	US EPA 7470A:1994 / PRO-150-07 - GH/AA
Níquel	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
PCS	NBR 11956:1990 / PRO-160-01 - Bomba Cal.
Potássio	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Selênio	US EPA 7742:1994 / PRO-150-07 - GH / AA
Silício	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Tálio	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Vanádio	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Zinco	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA
Telúrio	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007 - ICP
Óxido de Alumínio	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007
Óxido de Cálcio	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007
Óxido de Ferro	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007
Óxido de Potássio	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007
Óxido de Magnésio	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007
Óxido de Sódio	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007
Dióxido de Silício	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007
Óxido de Cobre	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007
Óxido de Zinco	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007
Pentóxido de Fósforo	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007
Dióxido de Titânio	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007
Óxido de Lítio	SMWW 3120 B:2005, US EPA 6010:2007
Cobre	US EPA 7000 B:2007 / PRO-150-07 - AA